EL ESPÍN

PAULI

Los electrones bailan



NATIONAL GEOGRAPHIC

WOLFGANG ERNST PAULI es uno de los grandes físicos teóricos del siglo XX y cofundador de la mecánica cuántica. Científico precoz, con tan solo veintiún años escribió un artículo sobre la teoría de la relatividad que se revelaría como todo un referente en la materia. Una de las principales aportaciones de este físico austríaco nacionalizado estadounidense es la teoría no relativista del espín, en la que añadió un cuarto número cuántico para determinar la medida del momento angular del electrón. Su principio de exclusión, según el cual dos electrones de un átomo no pueden tener idénticos números cuánticos, le reportó el Nobel en 1945. La existencia teórica del neutrino es otra de sus valiosas contribuciones a la ciencia.

EL ESPÍN

PAULI

Los electrones bailan

NATIONAL GEOGRAPHIC

JUAN ANTONIO CABALLERO CARRETERO es catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear en la Universidad de Sevilla. Desarrolla su trabajo de investigación en las áreas de Física Nuclear Teórica y Física Hadrónica. Colabora con investigadores de distintas universidades españolas, europeas y estadounidenses.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock: 84, 119b, 148; Archivo RBA: 23b, 35, 166; Biblioteca de Historia de la Universidad de Hamburgo: 57b; CERN: 23ai, 23 ad, 57a, 161ad; Benjamin Couprie/Instituto Internacional de Física de Solvay: 93b; ETH Zúrich Biblioteca/ Archivo de imágenes: 31, 161b; Fundación Nobel: 94, 161ai; Getty Images: 93a; Erik Gustafson/American Institute of Physics: 119a; Instituto de Estudios Avanzados de Princeton: 143b; The Mainichi Graphic/ The Mainichi Newspapers Co., Ltd.: 162; Museo de Ciencias de Londres: 143a; Ortsmuseum Zollikon: 120; Charles Scolik: 25.

ISBN: 978-84-473-7777-0
Depósito legal: B-20895-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

En la década de 1920 todos los caminos de la nueva teoría cuántica confluían en Copenhague. Allí, Niels Bohr, el padre del primer modelo cuántico del átomo, fundó su famoso instituto de física teórica en 1922. A partir de ese momento, el instituto de Bohr se convirtió durante algunos años en el centro receptor de todos aquellos investigadores, jóvenes doctores o simplemente estudiantes interesados en la nueva teoría cuántica. Aunque Bohr seguía manteniendo una actividad científica muy activa, el papel estelar en aquella década correspondió a una nueva generación de jóvenes físicos que llevó a cabo la mayor revolución nunca antes vista en el ámbito de la física y de la ciencia en general. Uno de aquellos jóvenes fue Wolfgang Pauli.

Todos los años, durante la primavera, se organizaba en el instituto de Bohr una conferencia en la que los participantes discutían sobre los últimos avances en la teoría cuántica. La conferencia de 1932 estuvo centrada en el descubrimiento del neutrón, realizado pocos meses antes por parte de James Chadwick. Este hallazgo fue de una importancia capital, puesto que permitió explicar y describir la estructura de los núcleos atómicos, es decir, la estructura de la materia. Sin embargo, también fue el origen de cierta confusión lingüística al coincidir su nombre con el que previamente había usado Pauli para denominar la «hipotética» partícula que se había visto obligado a introducir para explicar

el proceso radiactivo de decaimiento beta. El «neutrón» de Pauli, una partícula sin carga eléctrica y sin masa, fue el tema de recurrentes discusiones entre los físicos durante aquellos años; sin embargo, el término «neutrón» nunca apareció escrito en ninguna publicación científica antes del descubrimiento de Chadwick. Era obvio que ambas partículas, el neutrón observado por Chadwick y el «neutrón» hipotético de Pauli, eran muy diferentes y, por tanto, la partícula de Pauli tuvo que cambiar de nombre. Fue el físico italiano Enrico Fermi quien le dio su nueva denominación: «neutrino» (pequeño neutrón).

Las discusiones sobre el neutrino fueron tan intensas que algunos físicos, como el mismo Bohr, llegaron a cuestionar el propio principio de conservación de la energía. Otros, como Paul Ehrenfest, mostraron durante toda su vida una posición muy escéptica sobre la existencia del neutrino. De hecho, hubieron de transcurrir más de veinticinco años para que el neutrino de Pauli fuese finalmente observado experimentalmente (ello tuvo lugar en 1956). Durante la conferencia de 1932 los jóvenes físicos asistentes decidieron llevar a cabo una original representación del *Fausto* de Goethe. En la obra, Mefistófeles intenta persuadir por todos los medios al incrédulo Fausto para que acepte al «elusivo» neutrino. Pauli era el encargado de representar a Mefistófeles; el incrédulo Ehrenfest hacía el papel de Fausto, y Bohr actuaba como Nuestro Señor. En cierto momento de la representación, Bohr (el Señor) presentaba a Ehrenfest (Fausto) como su caballero, y la respuesta de Pauli (Mefistófeles) era: «Su caballero, su esclavo. Le advierto que, si me permite tentar a su caballero, hará todo aquello que yo desee». En otro momento de la obra, Bohr le preguntó a Pauli: «Si no considera masa ni carga, ¿qué queda pues?», y Mefistófeles contestó: «Querido Señor, la respuesta es elemental: el neutrino. Despierte y use su mente», una réplica que evidencia el especial carácter de Pauli.

Wolfgang Pauli nació con el siglo XX y formó parte de una nueva generación de jóvenes físicos que, durante la década de 1920, modificaron por completo el panorama de la física y la visión del mundo natural. Pauli, junto con Heisenberg, Dirac, Jordan, Born y Schrödinger, contribuyó a fundar la nueva teoría cuán-

tica, la denominada *mecánica cuántica*. Sin embargo, antes del nacimiento de dicha teoría, Pauli ya dio muestras de su enorme brillantez. Desde muy joven, durante sus años en la escuela secundaria, ya estaba considerado como un verdadero prodigio. Con dieciocho años recién cumplidos, antes de entrar en la universidad y solo tres años después de la aparición de la teoría general de la relatividad, publicó sus dos primeros trabajos sobre dicha teoría, trabajos que fueron elogiados por el eminente matemático Hermann Weyl.

Siendo un experto en la teoría de la relatividad, sus años en la Universidad de Múnich le llevaron por un nuevo camino: comenzó a explorar el extraño mundo cuántico bajo la supervisión de uno de los profesores más reconocidos del momento, Arnold Sommerfeld. Siendo un joven tan brillante y con un conocimiento tan profundo de la física clásica, el descubrimiento de las «leyes cuánticas» le produjo una gran inquietud. Él mismo, muchos años después, lo expresó con las siguientes palabras: «Cualquier físico acostumbrado a la forma clásica de pensar sufrió un *shock* cuando fue consciente por primera vez de los postulados básicos de la teoría cuántica introducidos por Bohr». A partir de ese momento y durante el resto de su vida, la teoría cuántica se convirtió en su compañera inseparable.

La enorme capacidad de Pauli y su intenso trabajo dieron frutos en muy pocos años. A finales de 1924, con solo veinticuatro años, Pauli ya había encontrado la respuesta al problema que le había obsesionado casi desde que entró en la universidad: la explicación del efecto Zeeman anómalo. El famoso principio de exclusión, conocido desde entonces como «principio de Pauli», estaba en su mente desde meses atrás, pero solo se atrevió a publicarlo cuando estuvo seguro de su corrección y valor. Una muestra más del carácter «hipercrítico» de Pauli, en este caso aplicado a sí mismo. El principio de exclusión es, con seguridad, la contribución científica más impactante de Pauli, y marca, en opinión de muchos físicos, su momento álgido de creatividad. A pesar de ello, Pauli siguió obsesionado durante años por el principio de exclusión, intentando encontrar un argumento sólido e incuestionable que permitiese justificar su razón de ser a partir

de los postulados básicos de la mecánica cuántica. El principio de exclusión fue fruto de un enorme trabajo, pero también de una sorprendente intuición. Quizá fue una de las pocas ocasiones en que Pauli permitió que su «genial intuición» venciese a su desmedido conocimiento y su visión crítica de la física. El principio de exclusión permite entender cómo se disponen los electrones en el interior de los átomos, proporcionando una explicación de la estructura íntima de la materia y de su estabilidad. Es difícil encontrar un campo en la ciencia donde el principio de exclusión no esté presente. Por dicha razón, no es fácil entender que transcurrieran veinte años desde su descubrimiento para que a Pauli le concediesen el premio Nobel.

La siguiente ocasión donde de nuevo pudo verse el «atrevimiento» de Pauli fue cuando postuló la existencia del neutrino. En este caso, necesitó varios años de continuas discusiones con sus colegas para decidirse finalmente a publicar su teoría.

El año 1925 marca el comienzo de la nueva teoría cuántica (el «nuevo testamento» en palabras de Pauli). Aunque Pauli tuvo una participación activa en dicho nacimiento, fueron otros físicos los que tuvieron el papel estelar, desarrollando las ideas germinales de la nueva visión del mundo físico. Heisenberg, Schrödinger y Dirac fueron los artífices directos de esta nueva revolución. Es indudable que ellos fueron los «creadores» de la nueva teoría, pero también resulta incuestionable que la visión crítica y las continuas discusiones de Pauli permitieron cimentar la mecánica cuántica, convirtiéndola en una teoría perfectamente coherente y consistente.

Pauli realizó contribuciones fundamentales en prácticamente todas las ramas de la física teórica. Uno de los campos que atrajo con mayor intensidad su atención, y en el cual trabajó durante toda su vida, fue el estudio de la interacción entre la radiación y la materia. Tras los trabajos seminales de Jordan y Dirac, Pauli y Heisenberg desarrollaron el formalismo que puso los cimientos de lo que años después terminó denominándose «teoría cuántica de campos». Pauli estuvo obsesionado toda su vida con este problema, y fueron famosas sus críticas y desavenencias con numerosos físicos, en especial con Dirac y lo que el mismo Pauli denominó su «íntimo enemigo»: la teoría de agujeros (o de huecos) de Dirac.

Al margen de sus indudables aportaciones científicas, Pauli fue famoso por su carácter difícil y sus mordaces críticas a todos aquellos estudios o teorías que requerían su atención. Para aquellos trabajos que consideraba poco importantes su único comentario era: «Ni siquiera son erróneos». Todos sus colegas, no importa el grado de reconocimiento que tuviesen, fueron blanco de sus dardos. Así, se cuenta la anécdota de que siendo aún un estudiante en la Universidad de Múnich asistió a un seminario impartido por Albert Einstein y, en cierto momento, en respuesta a un comentario realizado por Einstein, se le oyó exclamar desde el fondo de la sala: «[...] lo que el señor Einstein ha dicho no es completamente estúpido». En ocasiones, los comentarios podían resultar bastante más hirientes. Es famoso el primer encuentro de Pauli con el físico vienés Paul Ehrenfest. Tras una breve discusión, en la que con toda seguridad se puso de manifiesto el carácter de Pauli, Ehrenfest le dijo: «Después de haberle conocido personalmente, debo decirle que me agradan más sus trabajos que usted mismo». La réplica de Pauli fue inmediata: «A mí con usted me sucede lo contrario: me agrada más usted que sus trabajos». Aunque parezca difícil de creer, ambos físicos mantuvieron una estrecha amistad durante toda su vida.

Quizá la mejor forma de comprender el carácter y el comportamiento de Pauli es citar a uno de sus más estrechos colaboradores en la década de 1930, el físico Victor Weisskopf:

> En la primavera de 1933 fui llamado por Pauli para ser su ayudante durante los siguientes tres años. La reputación de Pauli era bien conocida por todos y pedí consejo a Peierls, quien había sido su ayudante los años previos. Peierls me dijo que no me preocupase: «Pauli es de hecho muy agradable, casi como un niño. Su supuesto carácter desagradable procede fundamentalmente de su honestidad científica. Siempre dice lo que piensa, y esto es lo que en ocasiones ofende a la gente». Con el tiempo pude comprobar que Peierls tenía razón. Cuando llegué por primera vez al despacho de Pauli y me presenté, sus palabras fueron: «Oh, sí, le estaba esperando, pero realmente a quien yo quería era a Bethe». Algunas semanas después, Pauli me dio algunos problemas para estudiar y al cabo de unos

días me preguntó sobre mis progresos. Tras mostrarle mi trabajo, su comentario fue: «Después de todo, debería haber contratado como ayudante a Bethe».

La actitud crítica y mordaz de Pauli fue una constante durante toda su vida. Su obsesión por entender perfectamente todos los aspectos relacionados con el problema analizado hizo que mostrase una actitud muy crítica, en ocasiones belicosa e incluso hiriente con respecto a algunos de sus colegas. Sin embargo, todo era reflejo de su propia personalidad y no tenía ningún atisbo de malicia. Muchos físicos consideran que esta fue precisamente la razón por la que sus contribuciones no fueron aún más originales y atrevidas. El físico estadounidense Steven Weinberg dijo en cierta ocasión: «Heisenberg y Dirac pueden haber sido más creativos que Pauli, pero ningún físico ha sido nunca tan brillante». La creatividad de Pauli en ocasiones permaneció oscurecida por la losa de su conocimiento enciclopédico. Sin embargo, ningún problema podía considerarse completamente resuelto antes de tener una respuesta clara a la siguiente pregunta: «¿Qué diría Pauli?».

Heisenberg es, probablemente, el físico que mejor lo conoció. Desde que coincidieron en la Universidad de Múnich a principios de la década de 1920, mantuvieron una amistad y una colaboración profesional que se mantuvo durante el resto de sus vidas. En 1968, ya fallecido Pauli, Heisenberg declaró en una entrevista:

> El carácter de Pauli era muy distinto al mío. Él siempre fue mucho más crítico. [...] Pauli siempre intentaba hallar inspiración en las evidencias experimentales, encontrando, de forma intuitiva, la íntima relación que existía entre las cosas. Al mismo tiempo, intentaba siempre racionalizar sus intuiciones a través de un lenguaje matemático riguroso, de modo que pudiese probar sin lugar a dudas todo aquello que afirmaba. Esto explica que Pauli publicara mucho menos de lo que habría podido publicar si hubiese abandonado uno de los dos postulados previos. Bohr publicó ideas que posteriormente resultaron ser correctas. Otros físicos desarrollaron métodos matemáticos muy elaborados. Pero las dos cosas juntas, creo sinceramente que resultan demasiado pesadas para una sola persona.

Como ya se ha apuntado, los dos momentos álgidos de creatividad en Pauli fueron cuando enunció el principio de exclusión y cuando postuló la existencia del neutrino. En ambos casos, la genial intuición consiguió sobreponerse al afán racionalizador de Pauli. En muchos otros casos no sucedió así, y fueron otros físicos los que se adelantaron en introducir ideas y conceptos que ya estaban en su mente. Esto es lo que sucedió, por ejemplo, con el espín. En este caso, Pauli no solo fue incapaz de dar un paso que ya estaba implícito en su principio de exclusión, sino que incluso desanimó a otros físicos a que lo diesen. A pesar de ello, Pauli terminó convirtiéndose en un referente fundamental para todos los físicos de su época. De hecho, algunos de sus colegas lo consideraban «la conciencia de la física teórica».

1900 Wolfgang Ernst Pauli nace en Viena (Austria) el 25 de abril.

1910 Comienza los estudios en el Döblinger Gymnasium.

1918 Se gradúa en el Döblinger Gymnasium. En otoño se traslada a la Universidad de Múnich y comienza sus estudios bajo la supervisión de Arnold Sommerfeld. Publica sus primeros trabajos sobre la teoría general de la relatividad.

1921 Obtiene el título de doctor *summa cum laude* y publica su artículo enciclopédico sobre la teoría de la relatividad. Conoce a Heisenberg. Se traslada a Gotinga como ayudante de Born.

1922 Es nombrado asistente del profesor Wilhelm Lenz en Hamburgo. En otoño se traslada a Copenhague invitado por Bohr. Trabaja sobre el efecto Zeeman anómalo. Al año siguiente regresa a la Universidad de Hamburgo.

1925 Introduce un nuevo número cuántico y enuncia el principio de exclusión.

1926 Describe el espectro del átomo de hidrógeno haciendo uso de la teoría de Heisenberg. Publica su trabajo conocido como «El viejo testamento». Acepta el concepto de espín introducido por Goudsmit y Uhlenbeck.

1927 Desarrolla la teoría no relativista del espín con la introducción de sus famosas matrices. Suicidio de su madre.

1928 Es nombrado profesor en el Instituto Politécnico Federal (ETH) de Zúrich (Suiza).

1929 Realiza su primer trabajo sobre la interacción radiación-materia en colaboración con Heisenberg. Abandona la Iglesia católica y contrae matrimonio con Kate Deppner.

1930 Anuncia la hipótesis del neutrino. Se divorcia de Kate Deppner.

1932 Comienza su relación con el psiquiatra Carl Gustav Jung. Al año siguiente contrae matrimonio con Franca Bertram.

1940 Abandona Zúrich al no conseguir la nacionalidad suiza y se traslada al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (Estados Unidos). Publica su trabajo sobre estadística y espín.

1945 Recibe el premio Nobel de Física por su descubrimiento del principio de exclusión, conocido como *principio de Pauli*. Einstein le considera públicamente su «heredero» científico.

1946 Regresa al ETH de Zúrich, donde permanecerá el resto de su vida.

1949 Adquiere la nacionalidad suiza. Publica con Felix Villars su trabajo sobre técnicas de regularización.

1958 Fallece en Zúrich el 15 de diciembre, a consecuencia de un cáncer de páncreas.

CAPÍTULO 1

Un joven prodigio

El siglo XIX finalizó con algunos descubrimientos sorprendentes en el campo de la física: los rayos X de Röntgen, la radiactividad de Becquerel y el electrón de Thomson. Nadie pudo prever entonces que para explicar dichos fenómenos sería necesaria una auténtica revolución conceptual, que tuvo lugar a principios del siglo XX cuando se formularon las primeras ideas cuánticas y la teoría de la relatividad. Pauli fue un experto en esta última, aunque a lo largo de toda su vida su verdadera obsesión fue comprender el mundo cuántico.

Wolfgang Ernst Pauli nació en Viena (Austria) el 25 de abril de 1900, el mismo año en el que el físico alemán Max Planck (1858-1947) dio a conocer al mundo su explicación de la radiación del cuerpo negro, introduciendo por primera vez la idea de que la radiación (la energía) se emitía o absorbía solo en cantidades discretas. Fue el inicio de la teoría cuántica, una nueva visión del mundo físico en la que las leyes clásicas de la física, tan asentadas hasta entonces, tuvieron que ser abandonadas. La estructura más interna de la materia y el comportamiento del mundo microscópico constituyeron un verdadero desafío para todos los físicos de la época. El cambio conceptual fue tan profundo que muchos físicos no pudieron aceptar las consecuencias que ello acarreaba.

Los experimentos se sucedían unos tras otros a un ritmo vertiginoso y proporcionaban una ingente cantidad de datos y evidencias que difícilmente podían explicarse. La sensación imperante entre los miembros de la comunidad científica era al mismo tiempo de excitación y de perplejidad e incluso de frustración. Era incuestionable que algo nuevo estaba surgiendo en el estudio de la naturaleza, algo muy diferente a lo que hasta entonces se conocía, y todo ello indicaba que se necesitaban nuevos caminos, nuevas formas de «mirar» y analizar el mundo físico. Sin embargo, durante años, la única forma en la que los físicos pudieron

enfrentarse a los retos planteados fue a través de «reglas» elaboradas ex profeso, que en muchos casos estaban en claro conflicto con la teoría clásica. Este fue el panorama con el que se encontró Pauli cuando empezó a adentrarse en el extraño y sorprendente mundo cuántico.

ANTECEDENTES FAMILIARES

Pauli nació en el seno de una familia católica de clase media-alta. Su padre era profesor en la Universidad de Viena, y su madre, que procedía de una acomodada familia vienesa, trabajó durante un tiempo como corresponsal en un conocido periódico de la época. A pesar de vivir en la capital austriaca, las raíces de la familia se hallaban en Praga. Su abuelo paterno, Jacob Pascheles, era un respetado miembro de la comunidad judía de la capital checa. Propietario de una librería, editor y autor él mismo, se casó con Helen Utitz, que pertenecía a una de las familias judías más acaudaladas de la ciudad. La familia Pascheles residía en el barrio de la Ciudad Vieja y participaba asiduamente en los actos de la Sinagoga Zigeuner de Praga. De hecho, Jacob Pascheles asistió en su condición de miembro destacado de esta sinagoga a la ceremonia de confirmación *(bar mitzvah)* de Franz Kafka en 1896. Aunque no está confirmado, el nombre familiar *Pascheles* parece proceder de *Pascuales*, originario de España.

El abuelo materno de Pauli, Friedrich Schütz, también nació en Praga en el seno de una familia judía. Fue escritor y periodista, y tras trasladarse a Viena en el año 1869, formó parte del comité editorial de la revista *Neue Freie Presse*, un periódico de tendencia liberal que era uno de los más influyentes de la época. A pesar de su ascendencia judía, Friedrich Schütz nunca fue practicante. En 1875 contrajo matrimonio con Bertha Dillner, una cantante de ópera que pertenecía a una conocida familia católica vienesa con antecedentes nobiliarios y que actuó en los teatros líricos más importantes de la época, como los de Colonia, Praga, Berlín, Stuttgart o la propia Viena. Bertha Dillner tendría

una influencia muy importante en la educación artística y cultural de su nieto.

Por otra parte, Pauli estuvo profundamente ligado a su madre, Bertha Camilla Schütz, una mujer de fuertes convicciones liberales y un profundo conocimiento de la literatura clásica. En una época en que las mujeres tenían enormes dificultades para acceder a la educación superior, Bertha Camilla fue una excepción y completó sus estudios en 1905. Sus profundos ideales pacifistas y socialistas tuvieron un fuerte impacto en el joven Pauli y ayudaron a modelar su carácter durante su etapa escolar. Eric Hula, compañero de Pauli en la escuela, manifestó muchos años después:

> Tras el comienzo de la Primera Guerra Mundial se despertó en Pauli un apasionado interés por la política, interés sustentado en gran parte por la gran actividad que su madre desarrollaba en aquellos años. Según pasaron los años, la oposición de Pauli a la guerra y, en general, al propio Imperio, fue cada vez más intensa.

El padre de Pauli, Wolfgang Josef Pascheles, nació en Praga en 1869. Allí cursó estudios de medicina, siendo alumno de Ernst Mach, uno de los físicos más renombrados del momento, y sin duda alguna, una de las personalidades más importantes de la vida cultural y científica de la capital checa. El joven Pascheles se sintió impresionado por el carácter y las ideas de Mach, quien terminó convirtiéndose en su maestro y modelo. Él mismo declaró años después que su relación con Mach fue el «suceso más importante de mi vida intelectual». En 1893 se doctoró en medicina y ese mismo año se trasladó a Viena, donde comenzó a ejercer como médico. Sin embargo, a los pocos años decidió abandonar la práctica de la medicina para comenzar una carrera como investigador en el campo de la química. Esta decisión fue en gran medida fruto de las sugerencias de Mach, quien en 1895 había sido nombrado catedrático de filosofía y física en la Universidad de Viena. Tres años después, Pascheles fue contratado también por la Universidad de Viena, donde permaneció gran parte de su vida, convirtiéndose en una figura destacada en el estudio de los coloides y las proteínas.

Su traslado de Praga a Viena supuso una ruptura total con el pasado. Inmediatamente después de la muerte de su padre, en 1897, solicitó y obtuvo el permiso oficial para cambiar su nombre familiar de Pascheles a Pauli. Algunos meses después abandonó el culto judío y fue bautizado como católico poco antes de contraer matrimonio. Parece no existir ninguna duda de que dichos cambios fueron consecuencia del creciente e intenso sentimiento antisemita que recorría Europa en aquellos años, el cual podía suponer un importante obstáculo en su afán por desarrollar una carrera en la universidad y como investigador. De este modo, el joven Wolfgang Pauli nació en el seno de una familia católica y solo supo de sus orígenes judíos muchos años después, en 1916, cuando fue informado de ello por su abuela paterna.

INFANCIA Y ADOLESCENCIA

Los primeros años de la vida de Pauli transcurrieron como correspondía a un niño vienés de clase media-alta. Aparte de sus profesores en la escuela primaria, su educación estuvo a cargo de su familia. Mientras su abuela materna se encargó de su educación artística y musical, y con frecuencia le llevaba a óperas y conciertos, su madre tuvo gran influencia en su educación humanística. Sin embargo, quien dirigió la educación general de Pauli fue su padre, quien desde muy joven le orientó hacia el estudio de las ciencias naturales. En estos primeros años también fue importante la figura de su abuelo paterno, a quien el joven Pauli acompañaba frecuentemente en sus paseos por el centro de la ciudad y en sus visitas a las tiendas de antigüedades.

Al margen de su familia, la persona que tuvo una mayor influencia en la educación de Pauli fue Ernst Mach. La relación entre este y su padre era tan estrecha, tanto a nivel personal como profesional, que Mach aceptó ser el padrino de Pauli cuando este fue bautizado. La profunda admiración que sentía el padre de Pauli por Mach hizo que eligiese el nombre de Ernst como segundo nombre de su hijo. Cuando Pauli tenía seis años nació su hermana Hertha







FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Fotografía de Wolfgang Pauli realizada en su época de estudiante.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Pauli junto a Albert Einstein. En su juventud, el primer gran interés de Pauli fue la teoría de la relatividad de Einstein, de la que se convirtió en un gran maestro.

FOTO INFERIOR:
Vista de la Universidad de Múnich desde Amalienstrasse en una postal de principios del siglo XX. En ella Pauli cursó sus estudios superiores.

Ernestina. El segundo nombre de la niña es una nueva muestra de la profunda admiración que sentía el padre de Pauli por Mach.

A los diez años, Pauli comenzó sus estudios secundarios en el Döblinger Gymnasium, un centro de prestigio, donde Pauli estudió ciencias naturales, física y matemáticas fundamentalmente, sin desatender tampoco las clases de filosofía y lenguas clásicas. A los catorce años había completado ya los estudios de cálculo y, siguiendo los consejos de Mach, comenzó a recibir clases adicionales de Wilhelm Wirtinger (1865-1945), profesor en la Universidad de Viena, que en aquellos momentos estaba considerado como el mejor matemático de Austria. Durante estos años en la escuela secundaria, Pauli y su padre visitaron en varias ocasiones a Mach, quien ya se encontraba por aquel entonces en un estado de salud muy deteriorado. Pauli recordó muchos años después estas visitas en los siguientes términos:

> Mach era un verdadero maestro en la realización de experimentos. Su apartamento estaba lleno de prismas, osciloscopios, espectroscopios, máquinas eléctricas, etc. Cuando le visitaba siempre me mostraba un experimento interesante. [...] Mach estaba convencido de la validez universal de su propia forma de pensar, la cual tomaba como punto de partida sus percepciones sensoriales y las pruebas y los experimentos que él mismo realizaba.

En 1918, tras ocho años en el Döblinger Gymnasium, Pauli finalizó sus estudios secundarios con las máximas calificaciones en matemáticas, física y filosofía. Por el contrario, su evaluación en lenguas clásicas obtuvo un simple grado de «satisfactorio». Muchos años después, Pauli escribió a su profesor de alemán en el Gymnasium comentándole que aún le sorprendía ver la mención «con distinción» en su diploma. Pauli reconocía en la carta a su profesor que, con la excepción de las matemáticas y la física, había sido un alumno mediocre en las demás asignaturas. No obstante, afirmaba:

> Seguramente se sorprenderá, pero estoy muy contento de haber asistido y completado las asignaturas de humanidades y haber aprendido

ERNST MACH (1838-1916)



Mach fue un físico y filósofo austriaco. Estudió en la Universidad de Viena, donde se doctoró en física en 1860. Posteriormente fue contratado por la Universidad de Graz y a partir de 1867 ocupó la cátedra de Física Experimental en la Universidad de Praga, ciudad donde permaneció 28 años. En 1895 fue nombrado profesor de filosofía inductiva en la Universidad de Viena. Tras sufrir un ataque de apoplejía, se retiró en 1905, siendo nombrado ese mismo año miembro del parlamento austriaco. Mach realizó contribuciones importantes no solo en el campo de la física, sino también en los de la filosofía, la fisiología y la psicología. En física, realizó aportaciones en los campos de la óptica, la termodinámica y la acústica. También realizó trabajos muy renombrados en mecánica. Su obra más conocida es *La ciencia de la mecánica: una visión crítica e histórica de su desarrollo*. Los estudios que realizó Mach sobre la física de fluidos condujeron al descubrimiento del denominado «cono de Mach»: una onda de presión que se forma cuando la velocidad de un objeto en un medio determinado es superior a la velocidad del sonido en dicho medio. Hoy en día se usa el término «número Mach» para indicar el cociente entre la velocidad del objeto y la del sonido. Desde el punto de vista de la filosofía, Mach fue un claro representante de la corriente positivista y creó, junto a Richard Avenarius (1843-1896), la corriente denominada «empirocriticismo». En su opinión, la ciencia solo debía estar basada en hechos que fuesen empíricamente comprobables. De este modo, Mach no creía en la «realidad» de los átomos, y criticó duramente la teoría de Boltzmann.

latín y griego. Con los años, he estado muy interesado en los textos científicos del siglo XVII, así como en los de los filósofos griegos, y el poder leerlos en su lengua original ha sido muy importante para mí.

La clase de Pauli en el Döblinger Gymnasium se ha conocido como la «clase de los genios». De los 27 alumnos que se graduaron en 1918, dos consiguieron el premio Nobel: Pauli y Richard Kuhn (1900-1957), premio Nobel de Química en 1938. Las excepcionales

aptitudes de Pauli le hicieron sobresalir desde el principio en el estudio de las ciencias, pero también le convirtieron en un estudiante problemático. No debió de resultar fácil para algunos de sus profesores dar clases a un alumno cuyo nivel de conocimientos era superior al que ellos tenían. Pauli reconoció que se aburría en algunas clases y, consiguientemente, se dedicó a estudiar otras materias. Así es como se inició su interés por la teoría general de la relatividad, que había sido propuesta por Einstein tan solo unos años antes y que en aquellos momentos muy pocos físicos podían entender en su totalidad. Dos meses después de su graduación, con dieciocho años recién cumplidos, Pauli publicó su primer trabajo sobre relatividad general, el cual asombró no solo a sus profesores sino también a los matemáticos y físicos más renombrados de la época, incluido el propio creador de la teoría de la relatividad.

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

En 1905, el *annus mirabilis* de la física, un joven investigador alemán de veintiséis años, Albert Einstein (1879-1955), publicó varios trabajos que modificaron completamente la visión del mundo vigente hasta aquel momento. Entre ellos, el titulado «Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento» introducía la teoría especial de la relatividad. Einstein resolvió la aparente inconsistencia que existía entre la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell eliminando toda referencia al éter y la posible existencia de un sistema de referencia absoluto. La teoría especial de la relatividad se construye a partir de dos postulados fundamentales: el principio de relatividad (todas las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales) y el principio de la constancia de la velocidad de la luz (la velocidad de la luz en el vacío es siempre la misma, independientemente del sistema de referencia inercial considerado). Estos dos postulados condujeron a una nueva percepción de aspectos fundamentales, como el espacio y el tiempo. Einstein mostró una «nueva» forma de mirar y analizar el mundo físico. La simultaneidad de sucesos,

el transcurso temporal entre eventos, la medida de las longitudes de los objetos, no son aspectos arbitrarios, pero tampoco absolutos. Se pueden determinar, pero su valor depende de en qué sistema de referencia se realicen las medidas, un resultado que ya se hallaba implícito en el segundo postulado propuesto por Einstein.

Otro aspecto esencial que surgió de la teoría especial de la relatividad y que tuvo un impacto enorme en la descripción del mundo microscópico fue el denominado principio de equivalencia masa-energía. La masa y energía de un cuerpo no son conceptos diferentes; son dos caras de la misma moneda. Es imposible desligar una de la otra, y la conclusión es manifiesta: la energía puede transformarse en masa, es decir, en partículas. El proceso inverso también resulta posible: las partículas (masa) pueden destruirse dando lugar a radiación (energía). Nos encontramos ante la posibilidad de procesos en los que las partículas pueden crearse y/o destruirse. Este hecho tuvo un impacto esencial en el desarrollo de la teoría cuántica y en cómo describir la interacción entre la radiación y la materia. La relación entre la energía y la masa viene dada por la expresión: $E = mc^2$ (c es la velocidad de la luz en el vacío), la ecuación más famosa de la física.

> «La teoría general de la relatividad fue algo único, estoy convencido de que sin Einstein aún estaríamos esperándola.»
>
> — Paul Dirac.

En 1915 Einstein extendió su teoría de la relatividad a sistemas de referencia no inerciales. De este modo, completó la denominada teoría general de la relatividad, su obra maestra. Einstein tuvo que reformular completamente la teoría de la gravitación de Newton, e introdujo la íntima relación que se da entre la geometría del espacio-tiempo y la cantidad de materia existente. La curvatura del espacio-tiempo viene determinada por la densidad de la materia. En otras palabras, la masa determina a través de su acción gravitatoria la «forma» del espacio-tiempo.

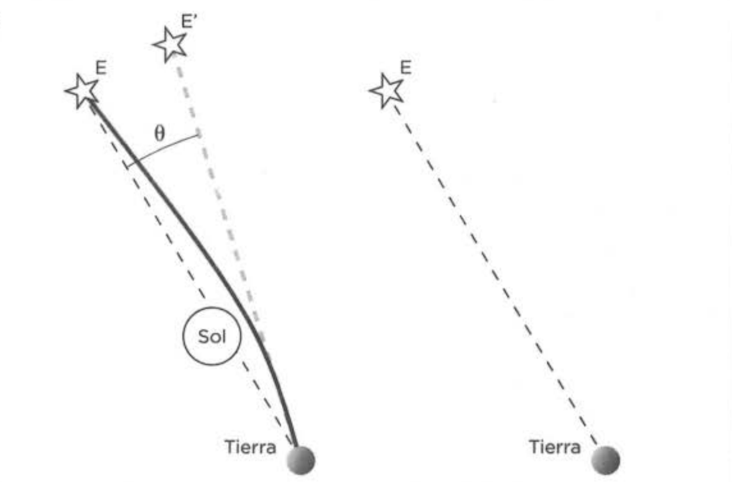
La teoría general de la relatividad fue reconocida desde el primer momento como una de las mayores creaciones del intelecto

humano. Una obra «majestuosa», básicamente completa, creada por una sola persona. Tras el trabajo de Einstein, muchos grandes físicos escribieron libros sobre esta teoría, con presentaciones diversas que intentaban «clarificar» conceptos. Sin embargo, el cuerpo esencial de la teoría y todos sus detalles técnicos ya habían sido completados por Einstein.

La teoría general de la relatividad mostró su superioridad sobre la teoría de Newton desde el mismo momento de su nacimiento. En 1915 Einstein pudo explicar por primera vez una anomalía en el movimiento de la órbita de Mercurio (el denominado movimiento del perihelio), hecho conocido desde mediados del siglo XIX. En noviembre de 1919 Einstein se convirtió en una figura mítica, el físico más importante y renombrado de la historia, cuando ese mismo año los astrónomos Dyson y Eddington realizaron una expedición a la isla africana de Príncipe y midieron cuidadosamente durante un eclipse la posición relativa de una estrella, comprobando que sus datos concordaban perfectamente con la predicción realizada por la teoría de Einstein. Esto significaba que la trayectoria de la luz se veía afectada por la presencia de materia (figura 1).

El 6 de noviembre de 1919 el presidente de la Royal Society, una de las instituciones científicas más prestigiosas del momento,

FIG. 1



Desviación de la luz procedente de una estrella debido a la presencia del Sol.

declaró que la confirmación de la teoría de Einstein por Dyson y Eddington podía considerarse el suceso científico más importante desde el descubrimiento del planeta Neptuno en 1846. Al día siguiente, el periódico *The Times* apareció con el siguiente titular: «Revolución en la ciencia. Nueva teoría del universo. Se desmoronan las ideas de Newton».

EL JOVEN PRODIGIO DE LA RELATIVIDAD

¿Cómo es posible que el joven Pauli fuese capaz, cuando todavía estaba en el Gymnasium, de comprender la teoría de la relatividad en todos sus detalles técnicos y, además, ya conociera toda la literatura especializada en el tema, a la cual hacía referencia en su trabajo? La mente excepcionalmente brillante de Pauli fue, sin duda alguna, la principal razón. Sin embargo, también fueron esenciales en su aprendizaje las clases que recibió de Hans Adolf Bauer (1891-1953), profesor de Física Teórica en el Instituto Tecnológico de Viena. Bauer, junto a Erwin Schrödinger (1887-1961) y Hans Thirring (1888-1976), eran los únicos físicos que en aquellos años abordaban en Viena los problemas de relatividad general. Sus trabajos, mencionados por Pauli en su primera publicación, influyeron indudablemente en su formación. Es interesante mencionar las palabras que pronunció Thirring tras el fallecimiento de Pauli en 1958:

> Conocí a Pauli en Viena cuando aún era un joven estudiante universitario. Recuerdo que se acercó a mí, no para preguntarme alguna cuestión, sino para proponerme un cálculo concreto que yo aún no había sido capaz de desarrollar. Nos sentamos, cada uno en un extremo de la mesa, y comenzamos a trabajar. Al final, llegamos al mismo resultado, pero con la diferencia de que él elaboró un procedimiento mucho más elegante y poderoso, finalizando el cálculo mucho antes que yo. Nunca me ha resultado tan evidente la superioridad de un colega como en aquel encuentro con el joven estudiante Pauli de veinte años.

Un año después de publicar su primer trabajo sobre la teoría general de la relatividad, cuando ya se hallaba estudiando en la Universidad de Múnich, Pauli publicó dos estudios en los que analizaba críticamente la teoría elaborada por el eminente matemático Hermann Weyl en la que se proponía por vez primera unificar la gravitación y el electromagnetismo. Los trabajos de Pauli impresionaron a Weyl de tal modo que aquel mismo año, le escribió una carta en los siguientes términos:

> Es para mí un gran placer darle la bienvenida como colaborador. Sin embargo, me resulta inconcebible comprender cómo a una edad tan temprana ha podido adquirir el nivel de conocimientos que muestra en sus trabajos, así como la libertad de pensamiento que es necesaria para asimilar la teoría de la relatividad.

EL ARTÍCULO ENCICLOPÉDICO

Arnold Sommerfeld, el profesor de Múnich con quien Pauli había decidido aprender la teoría cuántica, reconoció desde un primer momento las excepcionales facultades del joven estudiante. Así lo expresó Lise Meitner (1878-1968), famosa física austriaca y amiga íntima de Pauli, en una carta dirigida en 1959 a la viuda de Pauli: «En 1921 coincidí con Sommerfeld en Lund. Me comentó que tenía un estudiante tan brillante que ya no podía enseñarle nada nuevo [...] y, por tanto, le había pedido que escribiese un artículo enciclopédico».

Sommerfeld era uno de los editores de la famosa *Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften* («Enciclopedia de las ciencias matemáticas»), proyecto que había comenzado el gran matemático Felix Klein (1849-1925) y que cubría todas las ramas de las matemáticas y de la física. Sommerfeld pidió al propio Einstein que escribiese un artículo sobre la teoría de la relatividad, petición que Einstein declinó. Sommerfeld decidió entonces escribir él mismo el artículo con la colaboración de su estudiante Pauli. Sin embargo, el primer manuscrito que le presentó Pauli le dejó tan impresionado que decidió que el joven desarrollase todo el

HERMANN WEYL (1885-1955)



Weyl fue un matemático alemán, nacionalizado estadounidense, cuyos trabajos tuvieron un enorme impacto en la física teórica, especialmente en la teoría cuántica y en la teoría de la relatividad. Weyl estudió en la Universidad de Gotinga, donde se doctoró en 1908 bajo la supervisión de David Hilbert (1862-1943), el considerado mayor matemático de la época. En 1913 se integró como profesor de Matemáticas en el Instituto Técnico de Zúrich. Allí coincidió con Albert Einstein, quien en aquellos momentos se encontraba completando su teoría general de la relatividad. El contacto con Einstein tuvo una profunda influencia en Weyl. Desde el primer momento se sintió fascinado por los principios matemáticos de la teoría de Einstein, teoría que estudiaría en profundidad en los años siguientes realizando importantes aportaciones. En el campo de la matemática, en 1913 publicó *El concepto de una superficie de Riemann,* texto en el que presentó por primera vez un tratamiento unificado de la teoría de las funciones y la geometría. Los años que Weyl permaneció en Zúrich fueron sin duda su período más productivo. En esa época desarrolló una teoría de campos que intentaba unificar el electromagnetismo con la gravitación a partir de las propiedades geométricas del espacio-tiempo. Este trabajo, que Pauli citó repetidamente en su artículo enciclopédico, se considera el germen de lo que posteriormente se denominaron teorías de campo «gauge». Durante este tiempo, Weyl también desarrolló y extendió el uso de la teoría de grupos, una nueva rama de la matemática que había surgido a finales del siglo XIX en la física. En particular, su teoría de las representaciones de los grupos semi-simples fue considerada por el propio Weyl como su contribución más importante. En 1930 ocupó la cátedra de Matemáticas en la Universidad de Gotinga como sucesor de Hilbert. Sin embargo, en 1933, tras la toma del poder por Hitler, emigró a Estados Unidos (su esposa era judía) y se le ofreció una plaza en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, donde volvió a coincidir con Einstein. Weyl siempre mantuvo un enorme interés en el desarrollo de la física teórica, y sus trabajos permitieron cimentar y dar una gran consistencia matemática a la teoría cuántica. Dirac manifestó públicamente su admiración por Weyl y su obra.

trabajo por sí mismo. La decisión de Sommerfeld fue una muestra incuestionable de la plena confianza que el maestro tenía en la capacidad y conocimientos de su pupilo.

Pauli comenzó su trabajo sobre el artículo enciclopédico durante su cuarto semestre en Múnich, por lo que tuvo que compaginarlo con sus estudios sobre la teoría cuántica. El artículo, que apareció publicado en 1921, dos meses después de que Pauli hubiese recibido su doctorado en física, era una monografía de casi 250 páginas organizada en cinco grandes capítulos: los fundamentos de la teoría especial de la relatividad, las herramientas matemáticas, las elaboraciones más complejas de la teoría especial de la relatividad, la teoría general de la relatividad y las teorías sobre la naturaleza de las partículas elementales cargadas. El trabajo de Pauli contiene una presentación crítica de los fundamentos matemáticos y el significado físico de la teoría, y una completa discusión que cubre prácticamente toda la literatura que se había publicado sobre el tema. El número de referencias era cercano a 400. El manuscrito de Pauli fue considerado desde el primer momento una obra monumental, quizá el trabajo más completo y preciso que se había escrito hasta entonces sobre la teoría de la relatividad. Ni siquiera el mismo Einstein había elaborado ningún trabajo tan extenso y detallado. Los elogios fueron unánimes y la mejor muestra de ello es el comentario que el propio Einstein realizó sobre este trabajo en 1922:

> Nadie que estudie este majestuoso trabajo podría pensar que su autor es un joven de tan solo veintiún años. Uno no sabe qué admirar más: si la comprensión psicológica del desarrollo de las ideas, la seguridad de las deducciones matemáticas, el profundo conocimiento de la física, la capacidad para una presentación lúcida y sistemática, el conocimiento de la literatura, el tratamiento exhaustivo del tema o la seguridad de las argumentaciones críticas.

Nunca un físico tan joven había recibido tales elogios. Con los años, el trabajo de Pauli se convirtió en un libro que fue reeditado y actualizado por el propio autor en numerosas ocasio-

nes. Muchos de los físicos de las generaciones siguientes aprendieron relatividad a través del trabajo de Pauli, que aún hoy sigue siendo considerado uno de los mejores y más completos textos sobre el tema.

LA UNIVERSIDAD DE MÚNICH

En octubre de 1918 Pauli se matriculó en la Universidad de Múnich. Decidió abandonar Viena por la situación en la que se encontraba el Instituto de Física en aquellos años. Tras la muerte del profesor Fritz Hasenöhrl (1874-1915), sucesor de Ludwig Boltzmann (1844-1906) en la cátedra de Física Teórica, algunos de los físicos más eminentes de la época declinaron el ofrecimiento de la cátedra vacante. Empezó entonces un período de intrigas que condujo a un claro declive de esta disciplina en Viena. Esta situación contrastaba claramente con la que se había vivido en los años precedentes, cuando físicos que alcanzarían un gran renombre, como el mismo Erwin Schrödinger, el padre de la mecánica cuántica ondulatoria, habían sido contratados por la Universidad de Viena. Muchos años después, Pauli reconocería el completo acierto que supuso su decisión de abandonar Viena nada más terminar sus estudios en el Gymnasium.

La llegada de Pauli a Múnich coincidió con el final de la Primera Guerra Mundial y la consiguiente derrota de Alemania y Austria. Las durísimas condiciones económicas y territoriales impuestas por los vencedores trajeron consigo un período muy difícil para las potencias derrotadas, con innumerables revueltas sociales y una situación de caos generalizado, situación que se extendió por todas las ciudades del antiguo imperio. En abril de 1919 se proclamó en Múnich la República Soviética de Baviera, proclamación que estuvo seguida de la intervención del ejército y un estallido social sin precedentes. Ese mismo año se instauró la República Democrática de Weimar, régimen que perduró hasta 1933, cuando fue abolido por Hitler tras su toma del poder.

El Tratado de Versalles, el documento que en 1919 ratificó el fin de la guerra, estableció las indemnizaciones y las concesiones territoriales que debía hacer Alemania, país al que responsabilizaba del conflicto. Esta acusación de los países aliados surgió ya al comienzo de la guerra, provocando siempre las protestas de los intelectuales alemanes. Por otra parte, la ciencia alemana fue sometida a un aislamiento prácticamente total. Así, se entiende la desafiante declaración realizada al fin de la guerra por el gran físico alemán Max Planck (1858-1947):

> Cuando los enemigos han ocupado gran parte de nuestro territorio, cuando la mayor crisis ha surgido en nuestro país y cuando quizá una crisis aún más profunda esté por llegar en el futuro, hay algo que ningún enemigo externo o interno podrá quitarnos: la posición de la ciencia alemana en el mundo. Para mantener esta posición y, si es necesario, defenderla por todos los medios, disponemos de la Academia Prusiana de Ciencias, la institución científica más noble del Estado. Debemos preservarla como una de nuestras posesiones e identidades más valiosas.

Tres años después, Sommerfeld escribió: «La enorme mentira aliada sobre la culpabilidad alemana en la guerra continuará reinando durante algunos años más, pero no eternamente».

Cuando Pauli se incorporó a la Universidad de Múnich, las dos personalidades que brillaban en el departamento de física eran Arnold Sommerfeld, en física teórica, y Wilhelm Wien (1864-1928), en física experimental. La relación entre ambos profesores no era fácil; tenían diferentes caracteres e ideas políticas, y sobre todo, diferentes formas de entender y enfrentarse a los nuevos retos y problemas que la teoría cuántica había traído consigo. Heisenberg lo expresó de modo muy claro:

> Wien consideraba la física experimental como el centro de la física, y en cierto modo, le disgustaba la física teórica, especialmente, la relacionada con la nueva teoría cuántica. [...] Estaba acostumbrado a la forma clásica de pensar y calcular, lo que no parecía el modo más adecuado de moverse en el confuso mundo cuántico. Por el

ARNOLD SOMMERFELD (1868-1951)



Sommerfeld estudió matemáticas y ciencias físicas en la Universidad de Konigsberg. Tras doctorarse, se trasladó a la Universidad de Gotinga, donde fue ayudante de Felix Klein y obtuvo su habilitación en 1895. Posteriormente, fue contratado como profesor de Mecánica Aplicada en la Universidad de Aquisgrán, y finalmente, en 1906, se trasladó a Múnich como catedrático de Física Teórica. El resto de su vida permaneció en Múnich, donde creó lo que él mismo denominó un «jardín de infancia de física teórica». Sommerfeld adquirió un gran reconocimiento no solo como investigador, sino también como profesor y maestro. Como botón de muestra, cuatro de sus estudiantes de doctorado obtuvieron el premio Nobel de física: Heisenberg, Pauli, Debye y Bethe. Otros muchos se hicieron famosos realizando contribuciones fundamentales en muy diversos campos de la física. El trabajo más conocido de Sommerfeld fue su extensión del modelo atómico de Niels Bohr (1885-1962) con la incorporación de órbitas electrónicas elípticas. Para ello, Sommerfeld introdujo un segundo número cuántico. Asimismo, Sommerfeld incorporó la teoría relativista en su modelo explicando el desdoblamiento de las líneas espectrales en el átomo de hidrógeno que se había observado en diversos experimentos (la denominada «estructura fina»). Posteriormente, el modelo se extendió a las tres dimensiones espaciales introduciendo un tercer número cuántico.

contrario, Sommerfeld era más intuitivo, con un enorme instinto para entender dónde se escondían los verdaderos problemas físicos. [...] A Sommerfeld no le importaba trabajar en una especie de mundo neblinoso lleno de conocimientos inciertos.

Pauli llegó a Múnich precedido de su fama como joven prodigio y comenzó a trabajar con Sommerfeld, quien, aparte de su re-

nombre como investigador, era también considerado un profesor excepcional. Sommerfeld tenía ya en aquellos años una dilatada carrera investigadora, y había trabajado en campos muy diversos. Sin embargo, su aportación más impactante fue la extensión del modelo cuántico de Bohr del átomo con la incorporación de un nuevo número cuántico que le permitió introducir las órbitas electrónicas elípticas y, a través de las mismas, explicar numerosas evidencias experimentales. Además, Sommerfeld era autor de *Atombau und Spektrallinien* («Estructura atómica y líneas espectrales»), una de las obras más completas sobre la teoría cuántica.

Pauli comenzó a estudiar la teoría cuántica a través de los cursos impartidos por Sommerfeld y sus ayudantes, asistiendo también a las clases de física experimental impartidas por Wien. Sommerfeld tenía la costumbre de introducir a sus estudiantes desde el primer momento en temas de investigación, proponiéndoles problemas que debían ir resolviendo. De esta forma, Pauli comenzó a adentrarse en el extraño mundo cuántico. Aunque durante los primeros meses asistió con regularidad a todas las clases y seminarios, poco a poco comenzó a desarrollar un horario propio de trabajo, al cual ya se atuvo durante toda su vida. En palabras de Heisenberg, Pauli se convirtió en un «pájaro nocturno», desarrollando una intensa vida nocturna en cafés, teatros y espectáculos, tras los cuales trabajaba intensamente en los problemas de física durante el resto de la noche. Como consecuencia de este ritmo de vida, y para desesperación de Sommerfeld, Pauli no acudía a la universidad antes del mediodía y no asistía, por tanto, a las clases que se impartían durante la mañana. A raíz de esto, es conocida la anécdota de la respuesta de Pauli a un joven que le había pedido una cita a las nueve de la mañana: «Imposible, es demasiado tarde».

Pauli siempre mostró un profundo respeto y veneración por Sommerfeld, el único físico que se libró de sus mordaces críticas. Muchos años después, cuando Pauli era ya uno de los físicos más renombrados de la época, su relación con Sommerfeld seguía siendo la típica relación maestro-pupilo. Fue una gran diversión para los colegas de Pauli en Zúrich ver cómo asentía sumisamente

a los comentarios de Sommerfeld simplemente con: «*Ja, Herr Professor*» o «*Nein, Herr Professor*».

Pauli conoció también en Múnich a un estudiante, un poco más joven que él, que se convertiría con los años en la persona más influyente en su vida profesional, y con la que mantendría una estrecha relación académica y personal durante toda su vida: Werner Heisenberg (1901-1976). Se conocieron en 1920, cuando Heisenberg se trasladó a Múnich como nuevo estudiante de Sommerfeld.

> «Sommerfeld me presentó a Pauli y después me dijo que le consideraba uno de sus estudiantes más brillantes, alguien de quien podría aprender mucho.»
>
> — Werner Heisenberg.

Desde sus primeros meses en Múnich, Pauli se mostró muy independiente. Esto explica que sus publicaciones de la época apenas incluyan ningún agradecimiento, ni siquiera a su supervisor, Sommerfeld. No obstante, Pauli siempre fue uno de los estudiantes con una participación más activa en los seminarios del departamento. Intervenía continuamente en las discusiones, compartiendo generosamente sus ideas aunque aún no hubiesen sido publicadas. Esta se convirtió en su forma de trabajar durante el resto de su vida. Fueron numerosas las ocasiones en que Pauli dio a conocer sus ideas más brillantes a través de cartas y escritos dirigidos a sus colegas, y no a través de publicaciones formales. Así se explica la ingente correspondencia mantenida por Pauli, y que, en ocasiones, fueran otros físicos los que se llevaran el mérito de los descubrimientos.

Durante sus tres años en Múnich el trabajo de Pauli se centró en la elaboración de su artículo enciclopédico sobre la relatividad y en sus estudios sobre la estructura atómica haciendo uso de la teoría cuántica. Este último tema se convirtió en su obsesión y también en la pasión de su vida. Antes de describir su trabajo, veamos brevemente en qué situación se encontraba la teoría cuántica cuando Pauli llegó a Múnich.

LA VIEJA TEORÍA CUÁNTICA

El 14 de diciembre de 1900, ocho meses después del nacimiento de Pauli, Planck dio a conocer en una reunión de la Sociedad Alemana de Física sus ideas sobre un viejo problema, la radiación del cuerpo negro. Planck mostró una nueva expresión para la ley de radiación, es decir, el comportamiento de la energía de la radiación en función de la frecuencia y la temperatura. La ecuación de Planck era capaz de reproducir perfectamente los datos experimentales en todo el rango del espectro, e incluía como casos particulares las leyes que se habían desarrollado años antes: la ley de Stefan-Boltzmann y la ley de desplazamiento de Wien. Su ecuación fue un indudable éxito, pero en su derivación el propio Planck se vio obligado a introducir una hipótesis ciertamente extraña, un acto de desesperación en sus propias palabras: «La radiación se emite o absorbe en múltiplos enteros de una cierta cantidad límite, el cuanto». Esta hipótesis está considerada como el nacimiento de la teoría cuántica; sin embargo, en aquellos primeros años pocos físicos fueron conscientes del profundo cambio que dicha hipótesis traería consigo. El mismo Planck se mostró muy reticente a la idea de una cuantización de la energía, es decir, a que esta solo pudiese tener valores discretos. Planck no enfatizó el concepto de discontinuidad cuántica y consideró en un principio que la expresión $E = h\nu$ era una simple hipótesis matemática sin ningún fundamento físico. Durante algunos años la discontinuidad cuántica no fue considerada una propiedad que mereciese especial atención, y el mismo Planck fue incapaz de reconocer que la nueva ley de radiación conducía a una ruptura con la física clásica.

La deducción de la expresión de Planck tuvo su origen, en gran medida, en la teoría estadística que Boltzmann había desarrollado en la segunda mitad del siglo XIX. Planck supuso que el sistema (las paredes del cuerpo negro) estaba formado por un conjunto «finito» de N osciladores, todos ellos vibrando con la misma frecuencia, ν. Tras estimar el valor de la entropía total del sistema, Planck concluyó finalmente que la energía, compartida por igual por los N osciladores, era directamente proporcional a

la frecuencia (siendo h la constante de proporcionalidad). Este resultado implicaba la suposición de que la energía no pudiese variar de forma continua, es decir, que no fuese una magnitud infinitamente divisible.

El segundo hito en la teoría cuántica tuvo lugar en 1905, cuando Einstein publicó el trabajo titulado: «Sobre un punto de vista heurístico relativo a la producción y transformación de la luz». En este trabajo, por el cual recibió el premio Nobel de Física en 1921, Einstein explicó el efecto fotoeléctrico haciendo uso de la hipótesis de Planck. Sin embargo, Einstein fue mucho más allá que Planck. Mientras este último seguía pensando que la radiación misma venía descrita por las ondas continuas del electromagnetismo y la discontinuidad solo afectaba al intercambio de energía entre osciladores y radiación, para Einstein, la propia radiación electromagnética tenía una estructura discreta y estaba constituida por paquetes independientes de energía, es decir, por cuantos que obedecían la expresión de Planck. Algunos años después, Einstein aplicó la teoría cuántica al cálculo de los calores específicos de los sólidos consiguiendo reproducir de forma prometedora las evidencias experimentales existentes. Una versión más sofisticada de la teoría de Einstein fue desarrollada en 1912 por el físico holandés Peter Debye (1884-1966), consiguiendo mejorar apreciablemente la comparación con las medidas experimentales. El estudio de los calores específicos permitió que la teoría cuántica se extendiese y comenzase a ser conocida por un número cada vez mayor de físicos. Este hecho quedó claramente reflejado en las discusiones que surgieron durante la celebración de la primera edición de las famosas Conferencias Solvay, la cual tuvo lugar en Bruselas en 1911.

La hipótesis de Einstein sobre la cuantización de la radiación, y su consiguiente explicación del efecto fotoeléctrico, causó también una gran confusión en la comunidad científica. Era difícil imaginar cómo podrían explicarse los efectos de interferencia de la luz considerando que esta estaba constituida por corpúsculos de energía determinada. Algunos físicos consideraron que la hipótesis de Einstein significaba una vuelta a la vieja teoría corpuscular de la luz propuesta por Newton, la cual se consideraba

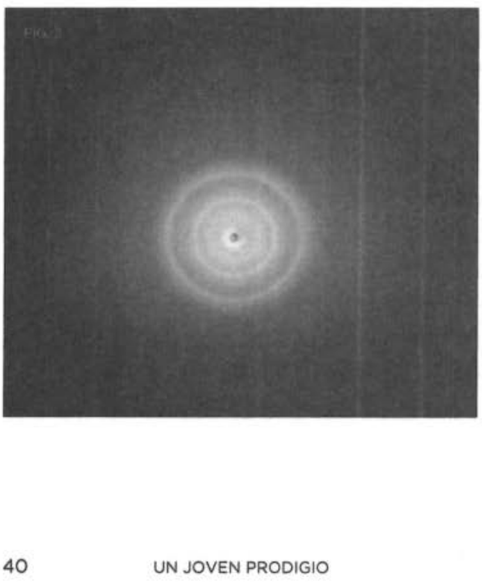
FIG. 2



Representación del proceso de dispersión Compton en el que un fotón interacciona elásticamente con un electrón.

plenamente superada por la teoría ondulatoria. La situación se tornó muy confusa en aquellos años, y el propio Einstein comenzó a hablar en 1909 de la dualidad onda-corpúsculo: «Por lo que sé, no ha sido todavía posible formular una teoría matemática de la radiación que haga justicia tanto a la estructura ondulatoria como a la estructura cuántica». El físico estadounidense Robert Millikan (1868-1953) se opuso durante años a la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico, aunque finalmente tuvo que admitir de modo inequívoco su validez, a pesar de su aparente inconsistencia con las propiedades de interferencia de la luz.

Las dificultades siguieron persistiendo al mismo tiempo que surgían los primeros modelos en que se aplicaba la teoría cuántica a la estructura atómica. Hubieron de transcurrir algunos años para que, finalmente, en 1923, la naturaleza corpuscular de la luz quedase plenamente asentada a través del experimento del físico estadounidense Arthur Compton (1892-1962). En el mismo, Compton analizó el proceso de dispersión de rayos X (radiación electromagnética de muy alta frecuencia) con electrones, comprobando de modo incuestionable que los datos experimentales podían describirse perfectamente considerando el proceso de dispersión como una colisión elástica entre dos partículas: el electrón y el cuanto de luz, denominado *fotón* (figura 2). El experimento de



Patrón de interferencia resultante en un proceso de difracción de electrones. Los anillos brillantes y oscuros que se observan corresponden a los máximos y mínimos de interferencia.

Compton se consideró la confirmación más clara sobre la «realidad» de los cuantos de luz. Sin embargo, aún persistía la aparente incompatibilidad entre el comportamiento corpuscular de la luz, necesario para explicar el efecto fotoeléctrico y el experimento Compton, y el comportamiento ondulatorio, que permitía describir los fenómenos de interferencia.

Tras los primeros intentos de Einstein, la explicación surgió en la mente de un joven noble francés que se encontraba realizando su tesis doctoral. Así, en 1924 Louis-Victor de Broglie (1892-1987) señaló que «al igual que los fotones presentan propiedades ondulatorias y corpusculares, quizá toda forma de materia presenta ambas características». De Broglie obtuvo la expresión matemática que relacionaba ambos caracteres, la longitud de onda (propiedad típicamente ondulatoria) y la masa y velocidad (propiedades corpusculares):

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Esta hipótesis implicaba que partículas tales como los electrones o los átomos debían presentar ambos tipos de efectos, corpusculares y ondulatorios. Así pues, el fenómeno de difracción con electrones (la situación más inmediata) era el experimento donde se pondría claramente de manifiesto la validez de la hipótesis de De Broglie. El experimento fue realizado de forma independiente por George P. Thomson (1892-1975) en la Universidad de Aberdeen y por los jóvenes estudiantes Clinton Joseph Davisson (1881-1958) y Lester Germer (1896-1971) en los Laboratorios Bell. En ambos casos las evidencias experimentales (figura 3), con un claro patrón de interferencia, concordaban con las predicciones de la teoría de De Broglie.

LOS MODELOS ATÓMICOS

Tras el descubrimiento del electrón por Thomson en 1898, la pregunta que se plantearon los físicos fue: ¿cuál es la estructura de

los átomos?, ¿cómo están constituidos? El electrón era el portador de la carga negativa, y puesto que los átomos se mostraban eléctricamente neutros, ello significaba que debían contener un número de partículas con carga positiva que igualase la carga negativa asociada a los electrones. Por otra parte, la masa de los átomos excedía enormemente el valor correspondiente a la masa de los electrones. Por consiguiente, la masa del átomo debía deberse casi en su totalidad a las partículas positivas. Sin embargo, ¿cómo se distribuían en el interior del átomo ambos tipos de partículas?

Tras algunos primeros intentos del propio Thomson, la respuesta a la pregunta previa vino de los famosos experimentos de dispersión realizados en 1911-1912 por Ernest Rutherford (1871-1937). Del análisis de los mismos se concluyó de modo incuestionable que la práctica totalidad de la masa del átomo se concentraba en una región cuyas dimensiones eran unos cinco órdenes de magnitud menor que el propio tamaño del átomo. Surgió de esta manera el concepto de núcleo atómico en el que se encontraban todas las cargas positivas (los protones). Por el contrario, los electrones se hallaban orbitando alrededor del núcleo.

No obstante, existían dos problemas fundamentales con este modelo «planetario». El primero era el de la estabilidad del átomo; el segundo, el de su tamaño. La teoría electromagnética mostraba claramente que toda partícula cargada en movimiento circular (las órbitas de los electrones) debía emitir energía. En tal caso, los electrones irían perdiendo paulatinamente energía y se aproximarían de forma continua al núcleo hasta colapsar. Esto significaría que los átomos no podían ser estables, hecho absolutamente en desacuerdo con la propia Naturaleza. La segunda cuestión, el tamaño del átomo, tampoco tenía explicación en el contexto del modelo propuesto por Rutherford. No existía ninguna ley o propiedad que permitiese determinar o simplemente justificar el porqué de unas órbitas y no de otras.

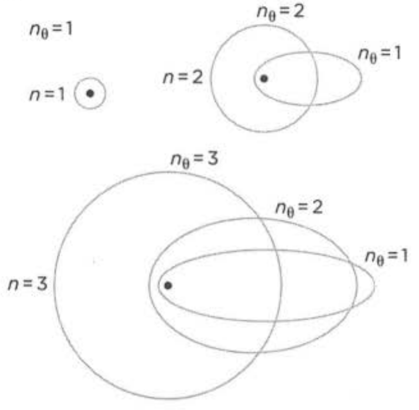
Era indudable que la solución a los problemas de la estructura atómica no podía venir de la física clásica, sino de las nuevas ideas cuánticas. Este es el camino que emprendió el joven físico danés Niels Bohr cuando introdujo su modelo, el primer modelo

cuántico del átomo. Bohr incorporó en el modelo planetario de Rutherford dos principios o postulados añadidos de forma *ad hoc*, y cuya justificación estaba ligada estrechamente a las ideas cuánticas introducidas por Planck, y sobre todo, por Einstein. El primer postulado de Bohr afirma que el electrón se encuentra en órbitas (denominadas «estados estacionarios») en las que no emite radiación y además, su momento angular está cuantizado, es decir, solo puede tener valores discretos. Según el segundo postulado, la energía, al pasar un electrón de un estado estacionario a otro, viene dada por $\Delta E = h\nu$, donde h es la constante de Planck, y ν, la frecuencia de la radiación. El primer postulado permite justificar la estabilidad atómica: solo son posibles aquellas órbitas en las que el electrón no emite ninguna radiación. El segundo postulado permite explicar qué sucede en el efecto fotoeléctrico. La radiación electromagnética incidente sobre el material excita a los electrones que pueden pasar de unas órbitas a otras o ser arrancados de las mismas, y ello depende no de la intensidad de la radiación, sino de su frecuencia.

Bohr construyó su modelo incorporando a la teoría clásica leyes o principios basados en la teoría cuántica, pero cuya justificación era difícil de aceptar. No obstante, y a pesar de su simplicidad, su éxito fue incuestionable. Bohr explicó y reprodujo satisfactoriamente muchas de las evidencias experimentales correspondientes al átomo de hidrógeno (el átomo más simple que existe con un protón y un electrón). Asimismo, la fórmula de Balmer, basada en pura numerología, y la relación de Rydberg-Ritz se obtenían fácilmente del modelo de Bohr, quien, además, pudo expresar la constante de Rydberg en función de la masa del electrón, su carga eléctrica y la constante de Planck. El valor calculado por Bohr coincidía, dentro de la precisión de las medidas, con el valor experimental. Einstein consideró el modelo de Bohr como «una de las más profundas manifestaciones del pensamiento humano».

Las órbitas electrónicas de Bohr eran circulares y su cuantización venía caracterizada a través de la introducción de un único número cuántico entero al cual se le denominó «número cuántico principal». Pocos años después, en 1916, Sommerfeld extendió el

FIG. 4



Las órbitas elípticas introducidas por Sommerfeld en el modelo de Bohr. La notación mostrada en la figura es algo distinta a la que se aceptó finalmente.

modelo de Bohr incorporando en el mismo la posibilidad de órbitas elípticas (figura 4).

La introducción de las órbitas elípticas implicaba la consideración de dos grados de libertad y, consiguientemente, Sommerfeld concluyó que se necesitaban dos números cuánticos enteros para describir las nuevas órbitas electrónicas. Sommerfeld obtuvo las expresiones para las energías de los estados estacionarios en función de los dos números cuánticos, a los que denominó n (el mismo introducido por Bohr) y l, comprobando que dichos estados eran degenerados, es decir, tenían exactamente la misma energía para determinados valores de los números cuánticos. Sommerfeld comprobó que todas las órbitas correspondientes al mismo valor de n, independientemente de que fuesen circulares o elípticas, tenían la misma energía. Expresado en términos más físicos, eran estados degenerados en el número cuántico l.

En una segunda fase de su trabajo, Sommerfeld incorporó en su modelo la teoría especial de la relatividad. Ello trajo consigo un efecto inesperado: la estructura fina del átomo de hidrógeno. En la teoría de la relatividad, la masa depende de la velocidad, y este hecho produjo que las órbitas elípticas de Sommerfeld avanzasen con el tiempo. En otras palabras, la posición de los afelios y perihelios de las órbitas cambiaba continuamente y estas dejaban de ser cerradas. Una consecuencia de este hecho fue que la energía de las órbitas electrónicas no dependía únicamente de la suma de los dos números cuánticos introducidos por Sommerfeld, como en el caso discutido en el párrafo anterior, sino de sus valores por separado. Esto introducía una pequeña diferencia en la energía que rompía la degeneración de estados. En otras palabras, aquellos estados estacionarios que poseían el mismo valor de la energía, ahora se separaban lige-

ramente debido a los efectos relativistas. Sommerfeld comprobó que dicha separación venía dada por el cuadrado de una cantidad

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c},$$

conocida como *constante de estructura fina*, y cuyo valor es aproximadamente 1/137. La predicción del modelo de Sommerfeld fue rápidamente confirmada por los experimentos realizados por el físico alemán Friedrich Paschen (1865-1947), y poco tiempo después el propio Sommerfeld extendió su modelo incorporando en el mismo todos los grados de libertad espaciales, lo cual le llevó a introducir un tercer número cuántico.

Los modelos de Bohr y Sommerfeld proporcionaron una explicación precisa de numerosas evidencias experimentales del átomo de hidrógeno. Sin embargo, otras muchas no pudieron explicarse. Estos eran los casos del efecto Zeeman anómalo (el cual se tratará en detalle en el próximo capítulo) y de los átomos con más de un electrón. Así, en 1924 la situación en la física era de una profunda crisis. Pauli fue muy consciente de esta situación desesperada y junto a otros jóvenes físicos participó activamente en la creación de una nueva visión del mundo físico. Sin embargo, antes de que tal visión surgiese, Pauli propuso su teoría más atrevida, aquella que le dio fama universal y que le hizo merecedor del premio Nobel muchos años después.

DOCTORADO «SUMMA CUM LAUDE»

La primera toma de contacto de Pauli con la teoría cuántica, aparte de las clases recibidas en la universidad, fue a través de sus estudios sobre las propiedades magnéticas de la materia. En una serie de trabajos publicados en 1920 y 1921 Pauli hizo uso de la teoría atómica de Bohr-Sommerfeld para calcular los momentos magnéticos y momentos cuadrupolares eléctricos de diversos átomos: helio (He) y argón (Ar). En estos primeros trabajos Pauli señaló que la única forma de entender la existencia de momen-

tos magnéticos permanentes era a través de la teoría cuántica. Asimismo, fue el primer físico en proponer como unidad de medida de los momentos magnéticos el denominado «magnetón de Bohr». Es interesante mencionar el estrecho contacto que mantuvo Pauli durante estos primeros trabajos con Schrödinger, interesado también en aquellos años en las propiedades magnéticas de los átomos.

El tema de la tesis doctoral elegido por Pauli fue el estudio de la molécula ionizada de hidrógeno formada por dos protones y un electrón. Pauli era consciente de su fama de joven prodigio y sabía perfectamente que su nivel de conocimientos en matemá-

MOMENTOS MAGNÉTICOS DIPOLARES ORBITALES: EL MAGNETÓN DE BOHR

Considérese un electrón de carga e y masa m moviéndose en una de las órbitas circulares del modelo de Bohr. La intensidad de corriente que circula por la espira, es decir, la carga por unidad de tiempo, es:

$$i = \frac{ev}{2\pi r},$$

donde v es la velocidad del electrón y r el radio de la órbita. De acuerdo con la teoría electromagnética clásica, una espira de corriente de intensidad dada produce a distancias grandes un campo magnético similar al de un dipolo magnético localizado en el centro de la espira y orientado perpendicularmente al plano de ella. El momento magnético dipolar es proporcional a la intensidad de la corriente y al área de la espira: $\mu = iA$. Introduciendo la magnitud del momento angular orbital $L = mvr$, puede escribirse finalmente:

$$\mu = \frac{eL}{2m}.$$

Para ser precisos, el momento magnético tiene carácter vectorial, siendo su dirección perpendicular al plano de la órbita (véase la figura). Por otra parte, en el modelo de Bohr, el momento angular de las órbitas electrónicas está cuantizado, es decir, L solo puede tomar valores discretos múltiplos enteros de la constante de Planck reducida:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

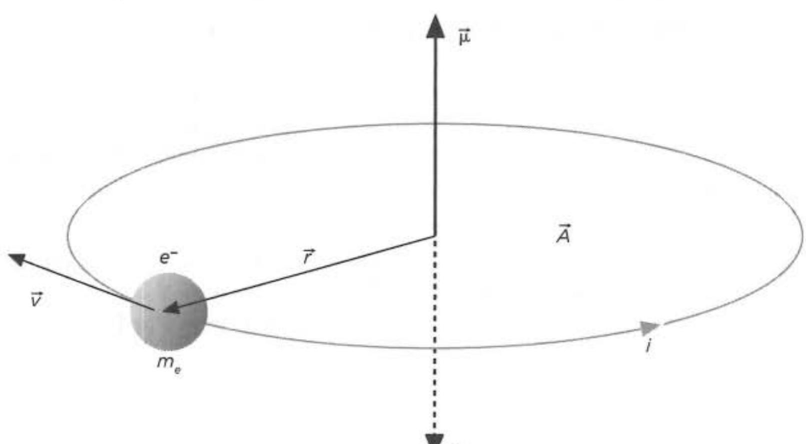
ticas y física clásica era muy superior al de sus compañeros, e incluso al de algunos de los profesores ayudantes. Este hecho le llevó a elegir como proyecto de tesis uno de los problemas más complicados. Lo expresó claramente Heisenberg con las siguientes palabras:

> Wolfgang decidió probarse a sí mismo con uno de los problemas más difíciles. Quería examinar si en un sistema complejo, para el que difícilmente sería incluso capaz de realizar cálculos, la teoría de Bohr y las condiciones cuánticas de Bohr-Sommerfeld conducían al resultado experimental correcto. En nuestras discusiones

Así pues, se introduce como unidad natural para la medida de momentos magnéticos dipolares atómicos la expresión

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m},$$

que se denomina «magnetón de Bohr», y cuyo valor en el sistema internacional de unidades es: $\mu_B = 9{,}27400899 \cdot 10^{-24} J \cdot T^{-1}$, donde J y T representan julios (unidad de energía) y teslas (unidad de inducción magnética), respectivamente.



en Múnich habían surgido dudas sobre si la teoría cuántica solo era apropiada en sistemas simples, llevando, por el contrario, a claras inconsistencias para el caso de sistemas más complejos.

Pauli comenzó su estudio sabiendo que el sistema del ión molecular de hidrógeno era uno de los problemas más complejos que podía tratarse con la teoría cuántica de Bohr-Sommerfeld. A pesar de ello, fue capaz de calcular y analizar los distintos tipos de órbitas electrónicas que surgían, determinando, además, si dichas órbitas eran o no estables. A continuación, tras un cálculo muy laborioso, obtuvo los valores de la energía y el tamaño correspondientes al estado fundamental de las distintas órbitas. Pauli estaba convencido de que solo él podía haber realizado tales cálculos. Por ello, fue toda una sorpresa comprobar que muchos de sus resultados fueron obtenidos de forma independiente por el joven Karel Niessen (1895-1967) en su proyecto de tesis presentado en la Universidad de Utrecht. Este hecho, junto a la gran discrepancia entre sus predicciones y las medidas experimentales, produjo en Pauli una gran frustración.

«[La teoría de Bohr-Sommerfeld] era tan confusa que solo se podía caminar a tientas en el seno de una profunda niebla que aún tardaría algunos años en levantarse.»

— Wolfgang Pauli.

Pauli presentó su tesis doctoral en julio de 1921, obteniendo la máxima distinción, *summa cum laude*. Sommerfeld señaló durante el examen que los trabajos de Pauli ponían claramente de manifiesto su total dominio de las herramientas modernas de la física teórica. Las palabras de Sommerfeld y la evaluación de la tesis, sin embargo, no pudieron evitar que Pauli tuviera cierta sensación de fracaso. Pero con el transcurso de los años pudo apreciarse la verdadera importancia del trabajo de Pauli en aquel momento, ya que fue la primera constatación de que la teoría cuántica conocida hasta entonces había alcanzado sus límites de aplicabilidad. El trabajo de Pauli mostró de modo inequívoco que

era necesaria una nueva visión, una nueva teoría construida a partir de principios fundamentales. Algo muy distinto al conjunto de reglas *ad hoc* que se habían ido superponiendo a la teoría clásica, en la mayoría de los casos sin una clara justificación, y que habían dado lugar a la denominada «vieja teoría cuántica».

Pauli fue un maestro en la teoría de Bohr-Sommerfeld. Sin embargo, desde el primer momento también fue muy crítico con las limitaciones de dicha teoría. Él mismo comentó a Heisenberg que las reglas de Bohr-Sommerfeld no eran otra cosa que «misticismo atómico». El trabajo de tesis doctoral de Pauli no hizo más que confirmar y mostrar aún con mayor claridad las limitaciones de la teoría cuántica de Bohr-Sommerfeld. Indudablemente, Pauli supo diagnosticar el problema, pero no fue capaz de ver cómo surgiría la nueva visión. Fueron otros físicos, como Heisenberg, Schrödinger y Dirac, los que dieron los primeros pasos; quizá ello fue consecuencia de la propia personalidad de Pauli y de su relación, extremadamente fuerte, con lo que él mismo describía como «el majestuoso edificio de la física clásica». Muchos años después, en 1958, Pauli escribió:

> Cuando era joven creía que era el mejor físico formal de mi tiempo. Pensaba que era un revolucionario. Cuando los grandes problemas llegasen yo los resolvería y escribiría acerca de ellos. Los grandes problemas llegaron y pasaron de largo. Fueron otros los que los resolvieron y escribieron sobre ellos. Yo aún era un clásico y no un revolucionario como pensaba.

CAPÍTULO 2

El principio de exclusión

Los años 1921-1925 fueron un período de excitación y también de zozobra para la física. Las ideas cuánticas y los modelos atómicos solo parecían funcionar para los sistemas más simples. La mayoría de los físicos tenía el convencimiento de que era ineludible una nueva formulación de la teoría cuántica. La nueva teoría llegó a mediados de 1925, pero meses antes, Pauli completó y dio a conocer el trabajo que le daría fama universal: el principio de exclusión, el cual permitía explicar la estructura de la materia.

Heisenberg se incorporó a la Universidad de Múnich en 1920, dos años después de que lo hiciera Pauli. A partir de ese momento, la relación entre los dos jóvenes, tanto en el aspecto profesional como en el personal, comenzó a ser cada vez más intensa. Aun cuando sus caracteres eran muy diferentes, ambos supieron percibir desde el primer momento la extrema brillantez del otro. Sin embargo, ni la admiración mutua ni la juventud de Heisenberg (que entonces era estudiante de primer curso en la universidad) fueron óbices para que Pauli mostrase su lado más duro y la crítica más mordaz cada vez que un trabajo de su joven colega no le satisfacía lo suficiente. Al contrario de lo que se podría imaginar, Heisenberg siempre apreció la opinión de Pauli.

El primer trabajo que Sommerfeld propuso a Heisenberg fue el estudio del efecto Zeeman, problema sobre el que ya había discutido en repetidas ocasiones con Pauli y que suponía un verdadero desafío para la vieja teoría cuántica de Bohr-Sommerfeld. El efecto Zeeman (que se tratará con detalle más adelante) consiste en el desdoblamiento de las líneas espectrales debido a la presencia de un campo magnético. Una línea o raya espectral es una línea oscura o brillante que aparece en un espectro continuo, indicando la emisión o absorción de radiación correspondiente a valores discretos de la frecuencia o longitud de onda. Heisenberg, a pesar de su juventud e inexperiencia, fue capaz de desarrollar un

modelo que reproducía los datos experimentales. Para ello hubo de introducir un concepto ciertamente extraño, el de números cuánticos semi-enteros, algo completamente inaceptable en aquellos años para Sommerfeld. Pauli tampoco pudo mantenerse al margen y dirigió su crítica e ironía contra Heisenberg, afirmando que «después de medios números enteros, Heisenberg usaría cuartos, octavos, etc.». Pauli se mostró extremadamente duro con la teoría de Heisenberg, considerándola «una teoría puramente formal, desprovista de nuevas ideas físicas». Incluso llegó a afirmar: «Me siento profundamente insultado por ella. Heisenberg es muy poco filosófico». Son palabras y descalificaciones que seguramente Pauli no quiso recordar algunos años después, cuando él mismo se vio obligado a introducir un nuevo número cuántico (semi-entero), cuyo significado era completamente desconocido, para poder explicar el efecto Zeeman. Este fue el origen del principio de exclusión y de la introducción del espín.

LA UNIVERSIDAD DE GOTINGA

En octubre de 1921 Pauli abandonó Múnich y se incorporó a la Universidad de Gotinga como ayudante de Max Born (1882-1970). Esta institución académica, fundada en 1734, era un centro de excelencia en Alemania, quizá el de mayor renombre universal en el campo de las matemáticas. Allí trabajó durante toda su vida uno de los matemáticos más famosos de todos los tiempos, Carl Friedrich Gauss (1777-1855), a quien sucedió otro matemático universal, Bernhard Riemann (1826-1866). En física, durante el siglo xix, la personalidad más destacada del centro fue Wilhelm Weber (1804-1891). Cuando Pauli llegó a Gotinga, la cátedra de Matemáticas estaba ocupada por David Hilbert (1862-1943), que estaba considerado como el mayor matemático de aquella época. En física existían dos institutos experimentales dirigidos por James Franck (1882-1964) y Robert Pohl (1884-1976), respectivamente, y un instituto teórico cuyo director, Max Born, se había incorporado a la universidad solo un semestre antes de la llegada de Pauli.

En muy pocos años Born convirtió la Universidad de Gotinga en el centro más importante de la teoría cuántica, compitiendo directamente con el instituto de Bohr en Copenhague. Ambos centros se convirtieron en obligados destinos de peregrinaje, y cualquier investigador o estudiante interesado en el conocimiento del mundo cuántico estaba obligado a visitarlos. De hecho, el flujo de investigadores entre ambas instituciones fue continuo durante aquella época. Hubo un profundo intercambio de ideas que terminó cristalizando en una nueva visión cuántica, una nueva teoría que cambió para siempre la faz de la física.

> «Mientras vivió, Pauli fue para mí y para cuanto intenté en el ámbito de la ciencia, un amigo y un crítico siempre bien acogido, aunque muy duro. Cuántas veces le oí decirme: eso es una estupidez.»
>
> — Werner Heisenberg.

Pauli llegó a Gotinga precedido de su fama y de su difícil carácter. Born lo describía en una carta dirigida a Einstein en los siguientes términos: «Pauli es asombrosamente listo y muy capaz. Además, es humano, bastante normal, alegre, como un niño, [...] el pequeño Pauli es muy estimulante. [...] Nunca volveré a tener un ayudante tan bueno». Poco tiempo después, Born tuvo que reconocer que su informe sobre Pauli no era del todo correcto: «Sin duda, Pauli es un genio de primera clase, pero mi comentario sobre la imposibilidad de volver a tener un ayudante tan capaz fue completamente injustificado». Tras Pauli, el nuevo ayudante de Born fue Heisenberg, un joven (en palabras de Born) «tan inteligente como Pauli, pero más consciente de sus obligaciones». Lamentablemente para Born, Pauli no modificó su horario de trabajo tras su llegada a Gotinga. Seguía disfrutando de la vida nocturna de la ciudad y, después, trabajaba el resto de la noche. Como consecuencia de ello, fueron numerosas las ocasiones en que no asistió a las clases que debía impartir a las 11 de la mañana. Born toleró el comportamiento de Pauli con cierto sentido del

humor y expresó: «Al final, decidimos enviar a nuestra doncella para asegurarnos de que se despertaba a tiempo para poder asistir a las clases».

Durante su estancia en Gotinga Pauli siguió trabajando en el tema que había constituido su proyecto de tesis doctoral. Este trabajo había dejado en Pauli una sensación agridulce. Gracias a sus excepcionales aptitudes, se había enfrentado a un problema complejo, pero los resultados obtenidos no habían sido nada prometedores. A pesar de ello, Pauli era demasiado orgulloso y brillante como para admitir que la discrepancia entre sus predicciones y las evidencias experimentales fuese consecuencia directa de su trabajo. Al contrario, estaba convencido de que poco más se podía hacer con el esquema de la teoría cuántica disponible en aquellos años. No obstante, su amor propio le hizo persistir y completar el trabajo de tesis con una extensa publicación que apareció en la revista *Annalen der Physik* en 1922.

Pauli comenzó también a colaborar con Born desarrollando la formulación de una teoría general de perturbaciones que pudiese aplicarse al estudio del átomo de helio y, en general, a átomos en presencia de campos externos eléctricos y magnéticos. El cálculo de perturbaciones era un método que estaba muy bien establecido en la física clásica, y que había permitido explicar numerosas evidencias experimentales. En este sentido, Born y Pauli hicieron mención especial al trabajo que desarrolló el gran matemático francés Henri Poincaré (1854-1912) en el campo de la mecánica celeste. Refiriéndose a Poincaré, Pauli señaló: «Fue uno de mis autores favoritos en mis años de juventud».

El trabajo de Born y Pauli, con la extensión de la teoría de perturbaciones al mundo cuántico, mostró que las líneas espectrales de los átomos sometidos a campos eléctricos y magnéticos se difuminaban. Este resultado, aun siendo consistente con las conclusiones obtenidas por Niels Bohr y Hans Kramers (1894-1952) en trabajos preliminares, difería significativamente del estudio que el físico Paul S. Epstein (1883-1966), otro antiguo estudiante de Sommerfeld, completó en la misma época. La colaboración entre Born y Pauli dio lugar a una publicación científica que apareció en la prestigiosa revista *Zeitschrift für Physik* el 29 de mayo de

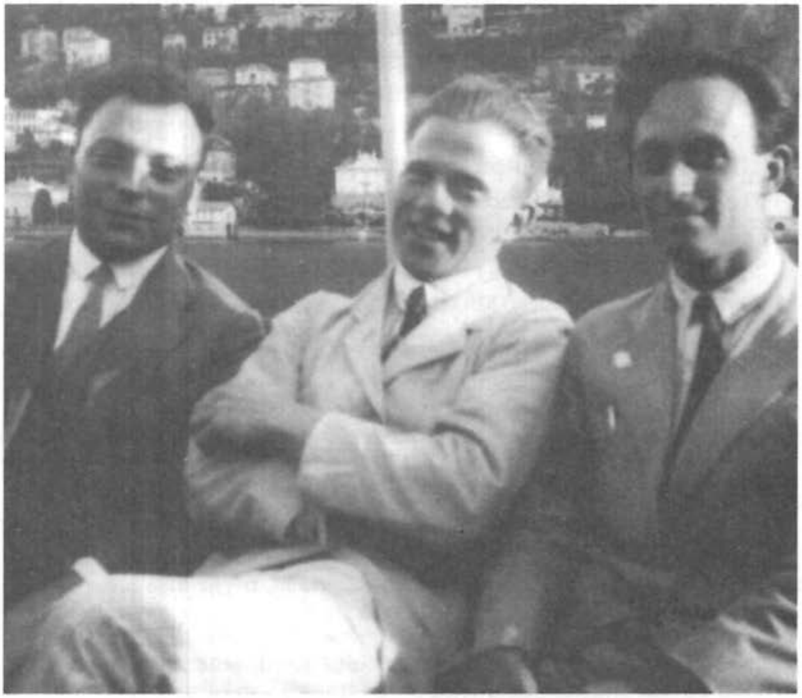


FOTO SUPERIOR:
Tres físicos que consiguieron el premio Nobel: de izquierda a derecha, Pauli, Werner Heisenberg y Enrico Fermi. La fotografía fue tomada en septiembre de 1927.

FOTO INFERIOR:
La Universidad de Hamburgo hacia 1920. Pauli dio clases en esta institución durante cinco años.



1922. Un año después, Pauli asistió a un seminario impartido por Epstein en Hamburgo e inmediatamente informó a Born y Bohr en los siguientes términos:

> Contrariamente a nuestra opinión y a nuestros resultados, el trabajo de Epstein muestra de modo claro que las ecuaciones de movimiento para el cálculo perturbativo son integrables. Así pues, las líneas espectrales están muy bien definidas y no se difuminan como nosotros concluimos. He verificado la teoría de Epstein, comprobando que su resultado es correcto.

EL EXPERIMENTO DE STERN-GERLACH

En 1922 Otto Stern era ayudante de Max Born en el Instituto de Física Teórica de la Universidad de Frankfurt, y Walter Gerlach, profesor ayudante en la misma universidad, pero en el Instituto de Física Experimental. Su experimento consistió en hacer atravesar un haz de átomos neutros de plata a través de un campo magnético no homogéneo orientado en una dirección determinada (figura 1). Puesto que los átomos son neutros, la única fuerza que actúa sobre los mismos es proporcional al momento magnético orbital μ_{lz}, donde, por conveniencia, se elige la dirección z como dirección del campo magnético. Así pues, cada átomo, al atravesar el campo magnético, sufre una deflexión que es proporcional a μ_{lz}. Desde el punto de vista clásico, el átomo puede presentar cualquier orientación espacial y, consiguientemente, el haz deflactado debería extenderse en una banda continua (panel izquierdo de la figura 2). Por el contrario, la teoría cuántica de Bohr-Sommerfeld (la existente en 1922) indicaba que el haz debería desdoblarse en varias componentes discretas. Este número de componentes venía determinado por el número posible de valores asociados a la proyección del número cuántico orbital l introducido por Sommerfeld, es decir, un número impar de $2l + 1$ posibles orientaciones, entre las cuales siempre debía aparecer el valor 0. Esto significaba que el experimento debería mostrar un número impar de líneas incluyendo el caso en que el haz incidente de electrones no sufriese ninguna deflexión. Stern y Gerlach encontraron que el haz de átomos de plata solo se desdoblaba en dos componentes discretas, una en la dirección positiva del eje z y la otra en la dirección negativa (panel derecho en la figura 2). Este resultado no era consistente con la teoría de Bohr-Sommerfeld, y solo pudo explicarse tras la introducción de un nuevo grado de libertad: el espín. El experimento de Stern-Gerlach constituye uno de los experimentos en los que se ilustra de modo más claro los principios básicos de la teoría cuántica.

Durante el tiempo que Pauli permaneció en Gotinga, mantuvo una correspondencia frecuente con Heisenberg, quien en aquellos momentos intentaba entender la física que se escondía bajo el efecto Zeeman. Heisenberg, en un alarde de atrevimiento e ingenio, propuso un modelo en el que los electrones de valencia (los menos ligados) se encontraban orbitando en torno al resto del átomo (el núcleo más el resto de electrones). Heisenberg hizo uso del término *atomrumpf* (tronco o corazón del átomo) para referirse a este sistema de núcleo más electrones internos. El verdadero atrevimiento de Heisenberg fue considerar que el

FIG. 1

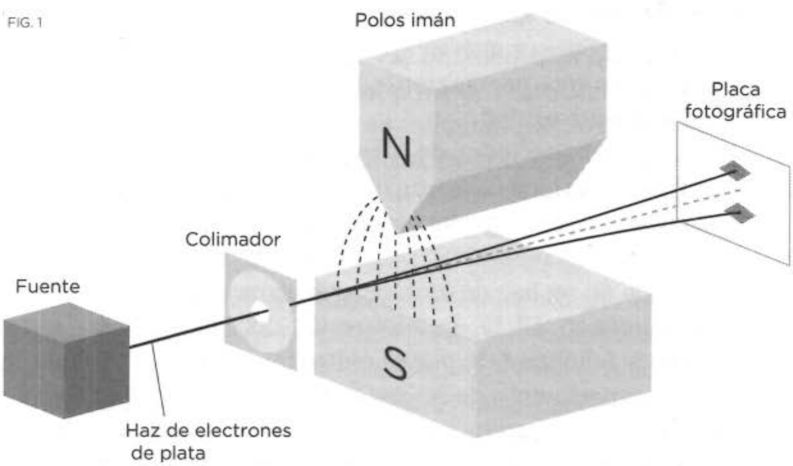
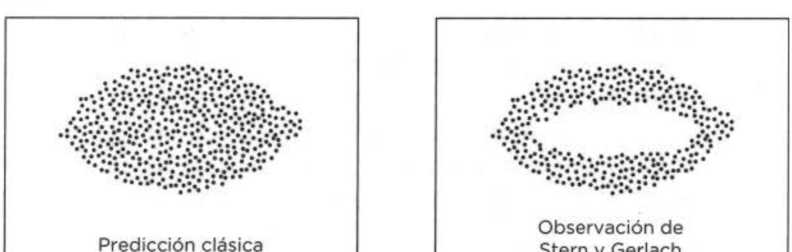


FIG. 2



momento angular se repartía entre el electrón de valencia y el *atomrumpf*. De esta forma, Heisenberg introdujo números cuánticos semienteros y, aunque no pudo justificar en ningún momento esta suposición, sí fue capaz de reproducir algunas de las evidencias experimentales del efecto Zeeman. Este trabajo, que dio lugar a la primera publicación científica de Heisenberg, fue criticado en términos muy duros por Pauli. Su carácter hipercrítico y su continuo afán racionalizador le impedían aceptar una teoría en la que sus principios esenciales se presentaban sin justificación alguna. A pesar de ello, el efecto Zeeman se convirtió en los años siguientes en un verdadero quebradero de cabeza para Pauli y fue una obsesión que tuvo completamente ocupada su mente. Al final, se vio obligado también a introducir conceptos extraños, cuya justificación solo fue posible muchos años después. En este caso, la intuición superó a su desmedido carácter crítico y, en el fondo, hubo de reconocer que su aproximación al problema no fue tan distinta a la que previamente había seguido Heisenberg y que tan duramente criticó.

Tras las vacaciones de Navidad de 1921, Pauli visitó a su colega Walter Gerlach (1889-1979) en Frankfurt. En aquellos momentos Gerlach se encontraba preparando un experimento propuesto por Otto Stern (1888-1969) para medir la cuantización direccional producida en un haz de átomos al atravesar un campo magnético no homogéneo. El 17 de febrero de 1922 Pauli envió una carta a Gerlach felicitándole por el éxito del experimento. Este fue el famoso experimento de Stern-Gerlach, cuya explicación solo fue posible con la introducción algunos años después de un nuevo concepto: el espín. El trabajo de Pauli fue esencial para entender dicho concepto; de hecho, el espín ya estaba implícito en la teoría que Pauli desarrolló para entender el efecto Zeeman y, en definitiva, para comprender la estructura de los átomos.

Nueve meses después de su llegada a Gotinga, en abril de 1922, Pauli se trasladó a la Universidad de Hamburgo, donde fue contratado como ayudante de Wilhelm Lenz (1888-1957). Pauli permaneció en Hamburgo los seis años siguientes, con la excepción del año que estuvo trabajando en el instituto de Bohr en Copenhague. Fue seguramente el período más fructífero de su

vida científica, en el que Pauli alcanzó su máxima cota de creatividad, surgiendo sus ideas más originales e impactantes.

ENCUENTRO CON BOHR

En junio de 1922 Born invitó a Niels Bohr a Gotinga para que impartiese una serie de charlas sobre el estado de la teoría cuántica y sus problemas para describir la ingente cantidad de evidencias experimentales que existían ya en aquellos años. Este encuentro coincidió con una serie de conciertos y actividades que se organizaron simultáneamente como homenaje al compositor barroco Georg Friedrich Händel. Por esta razón, el encuentro de físicos terminó conociéndose como el «festival Bohr».

En aquellos años Niels Bohr era el físico más influyente en la teoría cuántica. Su figura era un polo de atracción para todos aquellos jóvenes investigadores y estudiantes que deseaban adentrarse en el mundo cuántico. Su forma de trabajar, con discusiones sin fin sobre los fundamentos de la teoría y sus problemas, exigía a sus colaboradores un trabajo sin descanso y una dedicación absoluta. No podía pensarse en otra cosa hasta que el tema bajo estudio no hubiese sido completamente entendido. En ocasiones, los problemas persistían y ello sumía a Bohr y a sus colaboradores en un estado de frustración y desencanto. A mediados de 1922 Bohr se encontraba en el punto álgido de su fama. Unos meses antes había decidido crear el que se convertiría en su famoso Instituto de Física Teórica en Copenhague, y a finales del año, en diciembre, había recibido el premio Nobel de Física. Bohr era consciente de los graves problemas que aquejaban a la vieja teoría cuántica, pero estaba completamente convencido de que existía una senda por la que podría alcanzarse finalmente la luz. Era consciente de que dicha senda requeriría una nueva visión muy distinta a la que entonces se tenía, y que eso solo sería posible a través del trabajo de los más jóvenes, aquellos que aún tenían sus mentes abiertas a todas las posibilidades que pudiesen presentarse. Bohr lo reconoció explícitamente cuando en esos

años, refiriéndose a Heisenberg y a sus jóvenes colegas, comentó a uno de sus colaboradores: «Ahora todo está en sus manos».

Las charlas de Bohr tuvieron un impacto enorme para los físicos alemanes. Era prácticamente la primera vez, tras el final de la Primera Guerra Mundial, que un físico de gran renombre no alemán pudo ser invitado a una reunión en Alemania. En aquellos años, los países aliados, especialmente Francia e Inglaterra, sometieron a la ciencia alemana a un boicot casi absoluto. El encuentro de Gotinga contó con unos cien participantes, entre ellos, los más destacados científicos de las principales universidades alemanas: los matemáticos Felix Klein, David Hilbert, Carl Runge y Richard Courant y los físicos Max Born, James Franck y Robert Pohl (con sus colaboradores) de la propia Universidad de Gotinga; Arnold Sommerfeld y Werner Heisenberg de Múnich; Walter Gerlach, Alfred Landé y Erwin Madelung de Frankfurt; Paul Ehrenfest de Leiden y el propio Pauli de Hamburgo, entre otros. Bohr acudió acompañado por sus colaboradores Oskar Klein (1894-1977) y Wilhelm Oseen (1879-1944), e impartió sus seminarios durante dos semanas, realizando un análisis completo sobre la situación de la teoría cuántica y su aplicación a los sistemas más variados, desde el caso del átomo de hidrógeno hasta los átomos más complejos, pasando por los efectos introducidos por los campos eléctricos y magnéticos y una discusión sobre los espectros de rayos X. Bohr expuso claramente los éxitos de la teoría, pero tampoco mostró ningún reparo en mostrar sus deficiencias y limitaciones. De hecho, estaba convencido de que solo siendo plenamente conscientes de los problemas se podrían encontrar las soluciones.

Bohr fue indudablemente una fuente de inspiración para toda una nueva generación de físicos que llevarían a cabo unos años después el mayor cambio conceptual nunca antes visto en la física. En el encuentro de Gotinga fue donde Pauli y Heisenberg conocieron a Bohr, y en ambos casos, el encuentro cambió sus vidas.

Es interesante señalar la impresión que Bohr causó entre los más jóvenes asistentes al encuentro. En palabras de Richard Courant: «Los seminarios de Bohr eran excitantes y fuentes de inspiración para todos nosotros. Sin embargo, ni acústicamente ni de ninguna otra forma resultaban completamente compren-

sibles». Bohr tenía una «forma especial» de pronunciar tanto el alemán como el inglés que resultaba en ocasiones difícil de comprender. Otra peculiaridad de los seminarios de Bohr se producía cuando alguien le interrumpía para pedir alguna aclaración. La respuesta de Bohr era inmediata: «Por supuesto que no puede entender lo que estoy intentando explicar ahora; esto quizá llegue a ser comprensible, pero solo después de que haya oído la historia como un todo y haya entendido el final».

> «Una nueva fase de mi vida comenzó cuando me encontré por primera vez con Bohr.»
>
> — Wolfgang Pauli.

Bohr supo apreciar desde el primer momento la excepcional valía de Pauli y Heisenberg. Ambos terminaron formando parte del círculo más íntimo de Bohr, tanto a nivel profesional como personal. Durante la reunión de Gotinga, Bohr invitó a Pauli a su instituto de Copenhague para una estancia de un año. Pauli expresó en un primer momento su sorpresa, pero tras pensarlo brevemente su respuesta fue toda una muestra de su peculiar carácter: «Difícilmente creo que las demandas científicas que me pida puedan causarme ninguna dificultad, pero el aprendizaje de una nueva lengua como la danesa excede de lejos mi capacidad». En unos meses Pauli pudo comprobar cuán equivocado estuvo: «En el otoño de 1922 me trasladé a Copenhague, donde mis dos apreciaciones resultaron ser completamente erróneas». El aprendizaje del danés no le supuso ningún problema especial, pero la física resultó una historia muy distinta.

ESTANCIA EN COPENHAGUE

En julio de 1922, un mes después de finalizar el encuentro de Gotinga, Bohr escribió a Pauli manifestándole que en su instituto estaban esperando ansiosamente su llegada. Comenzó en ese mo-

mento una frecuente correspondencia entre los dos físicos que se extendió durante más de treinta años, hasta el fallecimiento de Pauli. Estas cartas se convirtieron en una de las fuentes más precisas de información para conocer el estado y los problemas de la teoría cuántica durante todos aquellos años. Pauli se incorporó al Instituto de Física Teórica de Copenhague en octubre de 1922 y permaneció en el mismo hasta septiembre del siguiente año.

La llegada de Pauli fue todo un acontecimiento para Bohr, quien consideró a Pauli como su *alter ego*, alguien con quien podía discutir sin fin el continuo torrente de ideas que surgían de su mente. Pauli, con su insuperable genio para la crítica, terminó convirtiéndose en su contrincante favorito para el debate. Léon Rosenfeld (1904-1974), uno de los ayudantes de Bohr, expresó que, incluso cuando Pauli no estaba presente, Bohr hacía uso de sus cartas: «La llegada de una carta de Pauli era un acontecimiento; Bohr nos la mostraba y discutía sus argumentos una y otra vez con todos aquellos que estuviesen interesados en el problema». Tanto Bohr como Pauli tenían necesidad de discutir continuamente sus ideas; sin embargo, nunca pudieron ponerse de acuerdo como para escribir sus nombres en una misma publicación.

Durante su estancia en Copenhague Pauli completó tres publicaciones en temas diversos. Por una parte, colaboró con Kramers, con quien ya había tenido frecuente contacto científico en los años previos, sobre la teoría de bandas espectrales. Pauli había realizado ya algunos trabajos en este tema y, por consiguiente, la colaboración entre ambos físicos resultó bastante natural. Además, Kramers y Pauli congeniaron desde el primer momento. Ambos tenían gran interés por la literatura y la filosofía, así como por la música; los dos físicos habían recibido una educación muy esmerada en música clásica y mantenían discusiones continuas sobre el tema. Kramers tocaba el piano y era un excelente violonchelista.

La segunda publicación de Pauli versó sobre el equilibrio térmico entre la radiación y los electrones libres. Este trabajo le sirvió como habilitación en la Universidad de Hamburgo tras su regreso de Copenhague. Pauli también colaboró directamente con Bohr en la traducción de algunos de sus trabajos. Fue Pauli quien

tradujo al alemán la conferencia que Bohr escribió para la ceremonia del premio Nobel.

> «El efecto Zeeman anómalo es el evento donde se ve más claramente cuán profundo es el fracaso de los principios teóricos conocidos hasta ahora.»
>
> — Wolfgang Pauli.

Por último, la tercera publicación de Pauli en Copenhague trató sobre el efecto Zeeman anómalo. Este era un problema que traía de cabeza a todos los físicos de la época y que se convirtió en una obsesión para Pauli en los años siguientes. Este primer trabajo de Copenhague marca el inicio de una serie de investigaciones y de un esfuerzo sin par, en el que Pauli tuvo que hacer uso de todas sus excepcionales aptitudes para poder llegar al final: la culminación de su máxima creatividad, en opinión de muchos físicos, a principios de 1925. En palabras del propio Pauli:

> Peleé durante mucho tiempo con el efecto Zeeman anómalo yendo frecuentemente por caminos equivocados, examinando y rechazando una y otra vez numerosas hipótesis. Pero no conseguía reproducir los datos experimentales. Esto terminó convirtiéndose en una profunda obsesión. Durante algún tiempo mi estado de ánimo fue de completa desesperanza.

PAULI Y EL EFECTO ZEEMAN

La cita previa expresa claramente el estado de desánimo y frustración en el que se encontraba Pauli al verse incapaz de explicar las evidencias experimentales del efecto Zeeman. Este fue uno de los experimentos que más claramente puso de manifiesto el fracaso de la vieja teoría cuántica. Veamos en qué consiste dicho efecto y por qué causó tal quebradero de cabeza a todos los físicos de la época.

El efecto Zeeman recibe su nombre del físico holandés Pieter Zeeman (1865-1943), quien en 1896 observó que las líneas espectrales atómicas se subdividían en varias líneas más en presencia de un campo magnético. Zeeman informó a su antiguo director de tesis, el físico y matemático Hendrik A. Lorentz (1853-1928), que inmediatamente explicó las observaciones de Zeeman haciendo uso de la teoría clásica del electromagnetismo. Ambos físicos, Lorentz y Zeeman, recibieron el premio Nobel por este descubrimiento en 1902. Sin embargo, en aquel año ya se conocía que la explicación de Lorentz no era completa. El mismo Lorentz escribió en 1900, dos años antes de recibir el premio Nobel, las siguientes palabras:

EL EFECTO ZEEMAN NORMAL Y ANÓMALO

El efecto Zeeman fue observado por primera vez en 1896 por el físico holandés Pieter Zeeman. Ese año Zeeman observó que al situar un átomo en presencia de un campo magnético externo, las líneas espectrales emitidas se desdoblaban en varias componentes. Este desdoblamiento se atribuía a la interacción entre el campo magnético $\vec{B}$ y el momento dipolar magnético asociado al momento angular orbital total $\vec{L}$. Así pues, los distintos niveles de energía vienen dados por la expresión:

$$\Delta E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\frac{\mu_B}{\hbar} \vec{L} \cdot \vec{B},$$

donde μ_B es el magnetón de Bohr. Teniendo en cuenta la cuantización del momento angular, los niveles de energía se encontrarían desplazados una distancia equidistante, a partir del nivel cero, dada por $\Delta E = m_l \mu_B B$. Las reglas de selección para las transiciones dipolares eléctricas implican $m_l = 0, \pm 1$, es decir, se produce el desdoblamiento en tres líneas espectrales. Este efecto se conoce como «efecto Zeeman normal» (panel izquierdo de la figura), y su interpretación pudo explicarse en términos de una teoría clásica desarrollada por Lorentz, y también haciendo uso de la teoría cuántica de Bohr-Sommerfeld. Zeeman también observó que en muchos otros casos el desdoblamiento de líneas espectrales era muy diverso, resultado que no podía entenderse en el contexto de la teoría cuántica desarrollada por Bohr y Sommerfeld. Por esta razón, a estas evidencias experimentales se las denominó «efecto Zeeman anómalo» (panel derecho de la figura). La explicación del mismo solo fue po-

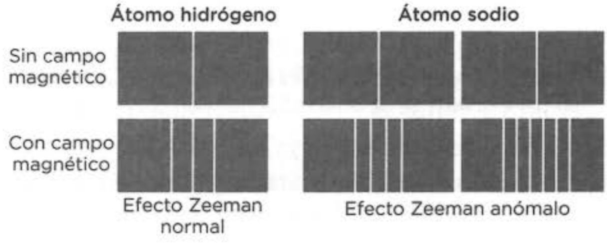
La mayoría de las líneas espectrales que han sido examinadas hasta el momento han mostrado los dobletes y tripletes que exige la teoría elemental. Sin embargo, existen numerosas excepciones a la teoría general.

La observación de dos (doblete) o tres (triplete) líneas espectrales era debido simplemente a que dicha observación se realizaba paralelamente al campo magnético o en una dirección perpendicular al mismo. Por el contrario, Lorentz se refería en su declaración previa a los descubrimientos del físico francés Alfred Marie Cornu (1842-1902) y el científico irlandés Thomas Preston (1860-1900), ambos realizados en 1898, en los que se observó un

sible cuando Pauli introdujo un nuevo número cuántico asociado al electrón, y cuyos valores solo podían ser dos. Esta nueva propiedad intrínseca de las partículas se denominó «espín». La introducción del espín como un nuevo momento angular intrínseco permitía la posibilidad de que se acoplase al momento angular orbital. Así pues, los niveles de energía podían expresarse finalmente en la forma:

$$\Delta E = -\frac{\mu_B}{\hbar}\left(\vec{L} + 2\vec{S}\right)\cdot\vec{B}.$$

Obsérvese que en esta situación el comportamiento es bastante más complicado, puesto que los vectores $\vec{L}$ y $\vec{S}$ están ambos precediendo el campo magnético, y no están en general en la misma dirección. La introducción del espín y su acoplamiento con el momento angular orbital permitió explicar perfectamente los resultados del efecto Zeeman anómalo.



desdoblamiento de las líneas espectrales en cuatro, seis e incluso más. A este fenómeno se le denominó «efecto Zeeman *anómalo*» para distinguirlo del efecto *normal* al que la teoría clásica de Lorentz proporcionaba una explicación.

Con el surgimiento de la teoría cuántica y el posterior desarrollo de los modelos atómicos, el efecto Zeeman terminó constituyendo un verdadero desafío para los físicos cuánticos de la época. Mientras que la teoría de Bohr-Sommerfeld pudo proporcionar una explicación del efecto Zeeman normal, el efecto anómalo, que terminó observándose con más frecuencia que el normal, siguió resultando inexplicable.

Uno de los científicos que trabajaron con más ahínco en este problema fue el físico alemán Alfred Landé (1888-1976), profesor en aquellos años en la Universidad de Tubinga, y antiguo estudiante de doctorado de Sommerfeld. Landé analizó cuidadosamente la separación entre las distintas líneas espectrales y propuso una expresión para dicha separación que estaba dada en función de la correspondiente expresión clásica, el número cuántico magnético introducido por Sommerfeld, y un factor constante g, conocido hoy como «factor giromagnético» o, simplemente, «factor g de Landé». El trabajo esencial de Landé fue determinar el valor específico del factor g para las distintas líneas espectrales que aparecían en el efecto Zeeman, ya correspondiesen a tripletes (efecto Zeeman normal) o a cualquier otro número de líneas (efecto Zeeman anómalo). Landé concluyó que solo era posible reproducir las evidencias experimentales introduciendo valores semienteros para los números cuánticos que caracterizaban las distintas órbitas electrónicas, es decir, las distintas líneas espectrales observadas.

De modo casi simultáneo, Heisenberg llegó a una conclusión similar en su primer trabajo de investigación (al principio de este capítulo ya vimos la controversia que suscitó). Heisenberg hizo uso del modelo *atomrumpf*, señalando que el valor semientero de los números cuánticos era resultado del acoplamiento entre el momento angular de los electrones de valencia y el momento angular del «tronco atómico». Sommerfeld envió una carta a Landé en 1921 en los siguientes términos: «Su nueva representación

coincide bien con lo que ha encontrado uno de mis estudiantes, pero que no ha sido publicado aún». Finalmente, Landé, haciendo uso de algunas de las ideas propuestas por Heisenberg, introdujo un número cuántico semientero relacionado con una rotación interna del propio tronco atómico (lo denominó R), y encontró una expresión general para el factor giromagnético g. El resultado de Landé fue descrito en 1925 por el físico neerlandés Samuel Goudsmit (1902-1978) como «totalmente incomprensible, pero con el cual se puede explicar el extenso y complicado material del efecto Zeeman anómalo».

Durante su estancia en Copenhague Pauli publicó dos textos sobre el efecto Zeeman en los que intentó encontrar una justificación del esquema propuesto por Landé. Sin embargo, todo su esfuerzo fue en vano, aumentando aún más su frustración y desánimo. Esto se refleja claramente en sus propias palabras: «No pude conseguir ningún acuerdo. Hasta ahora siempre he ido por un camino equivocado». Años después, él mismo recordó la siguiente anécdota:

> Un colega que me encontró deambulando por las bellas calles de Copenhague, me dijo amistosamente: «Pareces muy preocupado», a lo que yo repliqué abruptamente: «¿Cómo no se puede estar preocupado cuando se está todo el tiempo pensando sobre el efecto Zeeman anómalo?».

El efecto Zeeman anómalo siguió siendo una obsesión para Pauli tras su regreso a Hamburgo en octubre de 1923. No obstante, muy poco tiempo después encontró el camino que le condujo a su mayor descubrimiento, realizando una de las aportaciones científicas más importantes de la física. La idea estaba en la mente de Pauli, pero aún necesitó algún tiempo para salir a la luz. Encontró una justificación al resultado de Landé y a su descripción de todas las evidencias experimentales, pero tuvo que pagar un precio: la introducción de un nuevo número cuántico. Este, en muy poco tiempo, se convirtió en uno de los conceptos más fructíferos de la física, ya que nos permitió entender cómo está constituida la materia y por qué es estable.

EL NUEVO NÚMERO CUÁNTICO DEL ELECTRÓN

Tras su regreso a la Universidad de Hamburgo, Pauli impartió una conferencia sobre la estructura atómica. Años después, en el discurso que pronunció al recibir el premio Nobel, recordó:

> El contenido de la conferencia fue muy insatisfactorio, ya que el problema de llenado de las capas electrónicas aún no había sido resuelto. Lo que sí estaba claro en mi mente es que debía existir una relación muy estrecha entre este problema y la teoría de la estructura de multipletes que surgía en el efecto Zeeman.

Bohr había expresado claramente en numerosas ocasiones su frustración por no ser capaz de explicar cómo se iban disponiendo los electrones en las distintas capas electrónicas. ¿Qué razón impedía que todos los electrones ocupasen la capa más estable? Aunque no existía una respuesta clara, el modelo aceptado en aquellos momentos para explicar el efecto Zeeman consideraba como ingrediente esencial un momento angular del «tronco» del átomo y su posible acoplamiento con los electrones de valencia.

En los meses siguientes, Pauli estudió en detalle el caso de los átomos alcalinos (átomos con un solo electrón de valencia) concluyendo que la idea de un momento angular del tronco atómico era insostenible e inconsistente con numerosas evidencias experimentales. Pauli comunicó sus ideas a Landé en una carta que le dirigió a finales de 1924: «El desdoblamiento de las líneas espectrales de Zeeman que se obtiene, con una dependencia en el número atómico, no está de acuerdo con las observaciones». Más adelante, incidía en otros argumentos que resultaban incompatibles con el modelo de Landé:

> El argumento más importante está relacionado con su expresión para la diferencia de energía de los dobletes correspondientes a los átomos alcalinos. Su resultado muestra que no es posible interpretar dicha diferencia energética como energía de interacción con el tronco atómico.

Pauli no solo comunicó a Landé los problemas asociados a un momento angular no nulo para el tronco atómico, sino que le hizo partícipe también de la revolucionaria idea que había surgido en su mente; a pesar de ello, Pauli tuvo muchas dudas en publicarla, puesto que le parecía excesivamente simple. Por dicha razón, pidió consejo al propio Landé, preguntándole directamente si consideraba su «idea» lo suficientemente interesante como para ser publicada. Una vez más, el carácter hipercrítico de Pauli estuvo a punto de hacerle desistir del trabajo que terminaría convirtiéndose en su aportación más creativa e impactante.

El análisis de Pauli sobre los átomos alcalinos le llevó a la conclusión de que el momento angular del tronco atómico era cero y, por consiguiente, no podía tener ninguna contribución en la explicación del efecto Zeeman. Sin embargo, la expresión de Landé, construida a partir del modelo *atomrumpf*, funcionaba perfectamente, proporcionando una explicación muy precisa de todas las evidencias experimentales. La única opción disponible para Pauli fue admitir que todos los problemas asociados con la estructura compleja residían exclusivamente en los propios electrones de valencia, y no en el tronco atómico como se había pensado hasta entonces. Lo expresó claramente en el artículo que envió para su publicación en diciembre de 1924:

> Las configuraciones electrónicas cerradas *(rumpf)* no contribuyen al momento magnético o momento angular del átomo, y su cambio de energía en presencia de un campo magnético externo (efecto Zeeman) es debido exclusivamente al electrón de valencia.

Pauli introdujo así la hipótesis de una nueva propiedad cuántica del electrón de valencia, no describible clásicamente, y que solo podía tener dos valores.

¿Cuál era el significado físico de esta nueva propiedad cuántica (bivaluada) del electrón de valencia? ¿Era una propiedad que solo afectaba a los electrones de valencia o también podía aplicarse a todos los electrones atómicos? Pauli estaba a punto de descubrir el espín, la nueva propiedad cuántica necesaria para explicar el comportamiento de los electrones. Sin embargo, no

dio ese paso. Muchos físicos se preguntan aún por qué Pauli no fue capaz de introducir la idea del espín. Quizá fue resultado de su excesivo sentido crítico lo que le impidió aceptar un concepto completamente desvinculado del mundo clásico. Más aún, desanimó a otros colegas cuando le plantearon tal posibilidad. Quizá fue simplemente el resultado del propio discurrir de los acontecimientos.

En octubre de 1924 el físico inglés Edmund C. Stoner (1899-1968) propuso una regla para el llenado de las órbitas electrónicas. Este trabajo tuvo un importante impacto en Pauli, quien centró toda su atención en el problema de la configuración electrónica. Él mismo escribió a Sommerfeld: «He realizado algunos progresos respecto a la cuestión del cierre de los grupos de electrones en el átomo». De este modo, la cuestión sobre el posible significado físico de la nueva propiedad cuántica del electrón quedó oscurecida por el papel que dicha propiedad podría tener en la propia configuración electrónica. Esta fue la senda que siguió Pauli y que, en vez de conducirle al espín, le llevó a una propiedad también totalmente nueva e inesperada: el principio de exclusión.

EL PRINCIPIO DE EXCLUSIÓN: ESTABILIDAD DE LA MATERIA

¿Cómo se van disponiendo los electrones en los átomos?, ¿qué reglas permiten entender cómo se van llenando de electrones las distintas capas atómicas?, ¿qué relación existe entre este proceso de llenado y los distintos números cuánticos que caracterizan las órbitas? Estas eran preguntas que los físicos cuánticos llevaban planteándose desde hacía años y para las cuales aún no habían encontrado respuestas satisfactorias. En especial, Niels Bohr había analizado el problema en profundidad intentando encontrar un criterio que le permitiese explicar los famosos números máximos de ocupación: 2, 8, 18,... de las capas cerradas. Sin embargo, fue incapaz de encontrar dicha solución. Supuso, erróneamente, que para un valor dado del número cuántico principal n el número

máximo de ocupación era el mismo independientemente del valor del número cuántico l asociado al momento orbital (el número cuántico introducido por Sommerfeld para describir el carácter elíptico de las órbitas). A pesar del fracaso de Bohr, existía el convencimiento general de que era posible relacionar el llenado de las capas con los números cuánticos que las caracterizaban. Sommerfeld lo expresó claramente en octubre de 1924:

> Será inevitable que datos espectroscópicos más precisos produzcan conflictos con los modelos atómicos de Bohr. No obstante, estoy convencido de que dichos modelos son, en un amplio sentido, conceptualmente correctos, puesto que proporcionan una explicación sobre propiedades generales químicas y espectroscópicas.

La nueva propiedad cuántica introducida por Pauli permitió analizar el problema desde una nueva perspectiva. Pauli reconoció que fue en gran medida el trabajo de Stoner el que le puso directamente en el camino del principio de exclusión. Como ya se ha mencionado, Stoner propuso una nueva regla para explicar cómo se iban distribuyendo los electrones en las distintas capas. Este trabajo, publicado en octubre de 1924 en la revista *Philosophical Magazine*, produjo un profundo y rápido cambio en la visión de Pauli. La primera mención al principio de exclusión apareció en la ya citada carta que Pauli envió a Landé en noviembre de 1924, es decir, solo un mes después de la publicación de Stoner. El propio Pauli expresó en su discurso de aceptación del premio Nobel cómo tuvo lugar dicho cambio:

> En esa época apareció un artículo del científico inglés Stoner que contenía, además de mejoras en la clasificación de los electrones en subgrupos, la siguiente observación fundamental: para un valor dado de un número cuántico principal, el número de niveles de energía de un electrón, en los espectros de los átomos alcalinos en un campo magnético externo, es igual al número de electrones de la capa completa del gas noble que corresponde a dicho número cuántico principal. [...] A partir de mis resultados preliminares, la formulación general del principio de exclusión ya resultó evidente para mí.

La propuesta específica de Stoner para el llenado de las capas electrónicas fue la siguiente: «El número de electrones en cada capa completa es igual al doble de la suma de los números cuánticos internos que caracterizan la órbita en cuestión». ¿Cuáles eran esos números cuánticos internos asociados al electrón? En el marco de la teoría de Bohr-Sommerfeld la respuesta era clara. En primer lugar, el número cuántico principal introducido por Bohr y denotado como n. En segundo lugar, el número cuántico orbital l, cuyos valores están restringidos entre 0 y $n-1$. Por último, en el caso de electrones en presencia de un campo magnético externo, la orientación espacial viene determinada por el tercer número cuántico introducido por Sommerfeld, denotado por la letra m, y cuyos valores están comprendidos entre $-l$ y $+l$. Así pues, el número total de estados N asociados a un valor dado del número cuántico n es como sigue:

$$n=1:l=0:m=0 \Rightarrow N=1$$
$$n=2:l=0(m=0),l=1(m=-1,0,1) \Rightarrow N=4,$$

y así sucesivamente. Para $n=3$ es inmediato comprobar que el número de estados posibles es 9. En general, se satisface la relación siguiente: $N=n^2$. La regla de Stoner establecía que una capa correspondía a un valor dado de n, y que el número de electrones en dicha capa era igual a dos veces N. Sin embargo, no existía ninguna justificación para dicho resultado. ¿Por qué dos veces N? Fue Pauli quien halló la solución proponiendo nuevos postulados directamente relacionados con la nueva propiedad cuántica del electrón que introdujo para explicar el efecto Zeeman anómalo. Pauli señaló que la nueva propiedad era aplicable a todos los electrones atómicos, no solo a los de valencia. Esto le llevó a introducir un nuevo número cuántico que solo podía tomar dos valores semi-enteros: $\pm 1/2$ (en unidades de la constante de Planck reducida $\hbar$). Así pues, cada electrón viene caracterizado por cuatro números cuánticos y el valor doble de N requerido por la teoría de Stoner surge de forma natural. Pauli encontró la explicación de los famosos números mágicos, 2, 8, 18, etc., que permitían entender cómo se iban organizando los elementos químicos en la tabla periódica (figuras 1 y 2).

FIG. 1



FIG. 2

Átomo	Z	Configuración electrónica			
Li	3	$1s^2 2s^1$	↑↓	↑	
Be	4	$1s^2 2s^2$	↑↓	↑↓	
B	5	$1s^2 2s^2 2p^1$	↑↓	↑↓	↑ · ·
C	6	$1s^2 2s^2 2p^2$	↑↓	↑↓	↑ ↑ ·
N	7	$1s^2 2s^2 2p^3$	↑↓	↑↓	↑ ↑ ↑
O	8	$1s^2 2s^2 2p^4$	↑↓	↑↓	↑↓ ↑ ↑
F	9	$1s^2 2s^2 2p^5$	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑
Ne	10	$1s^2 2s^2 2p^6$	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓

FIGURA 1: **Representación gráfica del llenado de electrones en las distintas capas electrónicas. Para un estado dado, caracterizado por los tres números cuánticos: n, l, m_l (representados por las líneas horizontales o la órbita esférica), solo son posibles dos electrones con el cuarto número cuántico opuesto (representado por las dos orientaciones de las flechas). La notación s, p hace referencia al valor del número cuántico l: s ($l = 0$) y p ($l = 1$). El número que precede a las letras s (p) indica el valor de n. El superíndice muestra el número de electrones.**

FIGURA 2: **Ilustración que muestra cómo se van disponiendo los electrones en los distintos orbitales de diversos átomos.**

Sin embargo, aún quedaba una pregunta por responder: ¿por qué en una capa no pueden existir más de $2N$ electrones? En otras palabras, ¿qué propiedad impide que un número determinado de electrones puedan ocupar un estado con valores fijos de los cuatro números cuánticos? La respuesta de Pauli fue el enunciado del famoso principio de exclusión:

> En un átomo nunca pueden existir dos o más electrones equivalentes para los cuales los valores de los cuatro números cuánticos coincidan. Si un electrón existe en un átomo con valores definidos de sus cuatro números cuánticos, entonces el estado está ocupado; ningún otro electrón está permitido.

Pauli envió su trabajo a publicar en enero de 1925, unas seis semanas después de haber enviado el trabajo previo en el que anunció la nueva propiedad cuántica del electrón. El título del

trabajo fue: «Sobre la conexión entre la completitud de los grupos de electrones en un átomo y la estructura compleja de los espectros», y apareció publicado en la revista *Zeitschrift für Physik* el 21 de marzo de 1925. En el momento de su aparición el impacto del trabajo de Pauli fue bastante reducido. Aun cuando apenas contenía ecuaciones, Pauli hizo uso de una notación poco familiar para la mayoría de sus colegas, quienes se quejaron de la dificultad en seguir sus argumentaciones. Más aún, el resultado de Pauli fue percibido por muchos físicos como demasiado abstracto, demasiado difícil de aprehender. Pauli era plenamente consciente de estas dificultades, llegando a afirmar: «No podemos dar una razón más precisa de esta regla». Muchos años después, en su conferencia del premio Nobel, señaló:

> Ya en mi trabajo original mencioné la circunstancia de que era incapaz de dar una razón lógica para el principio de exclusión o para deducirlo a partir de consideraciones más generales. Siempre tuve el sentimiento, y aún lo tengo hoy, de que esto era una clara deficiencia.

A pesar de las reticencias de Pauli, que constituyen un nuevo ejemplo de su afán por racionalizarlo todo y de su desmedida obsesión crítica, el principio de exclusión terminó convirtiéndose en un ingrediente crucial para entender la tabla periódica de los elementos químicos. Hoy día, es simplemente imposible comprender la estructura de la materia y su estabilidad sin tener en cuenta el principio de exclusión. El físico y matemático B.L. van der Waerden (1903-1996) escribió en 1960:

> El propio Pauli vio las dificultades desde el primer momento y no consideró su punto de vista como definitivo. Así pues, debemos admirar su coraje y persistencia al desarrollar las consecuencias lógicas de su hipótesis. El desarrollo subsiguiente de la mecánica cuántica condujo a una justificación completa de todas sus suposiciones.

En 1926 Dirac denominó al principio de exclusión como «principio de Pauli», denominación que ha persistido desde entonces.

CAPÍTULO 3

El espín y la mecánica cuántica

El espín, uno de los conceptos más importantes de la física en el siglo XX, estaba implícito en el principio de exclusión. Sin embargo, Pauli no supo apreciarlo en un primer momento. Más aún, se opuso radicalmente a que otros físicos dieran a conocer sus ideas sobre el mismo. Sin embargo, y a pesar de sus reticencias iniciales, fue Pauli quien desarrolló el formalismo general del espín en el contexto de la mecánica cuántica. No obstante, siempre fue consciente del límite de su aplicabilidad al no ser consistente con la teoría de la relatividad.

En ocasiones se atribuye a Pauli la idea del espín. En cierto modo parece natural pensar que el físico que introdujo un nuevo número cuántico del electrón para explicar el efecto Zeeman anómalo proporcionase, asimismo, un significado físico para dicho número cuántico. Sin embargo, no fue así y, lo que resulta aún más extraño, cuando otros físicos propusieron una teoría en torno al espín del electrón se encontraron con un rechazo frontal por parte de Pauli. Aún hoy resulta difícil comprender este comportamiento de Pauli, quien, sin embargo, fue lo suficientemente atrevido como para introducir el principio de exclusión a pesar de que no disponía de ninguna justificación «racional» del mismo. Quizá el desarrollo de acontecimientos que llevaron finalmente al descubrimiento del espín no es más que una muestra del doble sentimiento que invadía a los físicos de aquella época, cuando se estaban llevando a cabo las más innovadoras investigaciones.

Por una parte, la sensación de euforia y de excitación que producía saber que se estaba construyendo algo completamente nuevo, y por otra, las dudas, las vacilaciones, la frustración, el desencanto que se asentaba en el ánimo de muchos físicos, Pauli entre ellos, al verse incapaces de explicar y entender por qué la naturaleza se comportaba de una u otra forma.

LA EXTRAÑA HISTORIA DEL ESPÍN

El descubrimiento del espín está ligado al trabajo de dos jóvenes estudiantes de la Universidad de Leiden, George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit. Durante el verano de 1925 ambos jóvenes, a sugerencia de Paul Ehrenfest (1880-1933), estudiaron con detalle las investigaciones realizadas meses antes por Landé sobre el efecto Zeeman, y especialmente, los dos trabajos de Pauli en los que había introducido el cuarto número cuántico y el principio de exclusión. Goudsmit, a pesar de su juventud, era ya un experto en el análisis de los espectros del efecto Zeeman. Por el contrario, Uhlenbeck, con una formación teórica más sólida, apenas había estudiado previamente este problema. El propio Goudsmit señaló refiriéndose a Uhlenbeck: «Apenas sabía nada del tema, por ello siempre hacía todas aquellas preguntas que yo nunca hice». Uhlenbeck estaba impresionado por la teoría de Pauli y su explicación del efecto Zeeman, pero al mismo tiempo estaba convencido de que era ineludible completar la teoría proporcionando un significado físico al nuevo número cuántico del electrón. Uhlenbeck señaló:

> Yo estaba impresionado, pero como todo era puramente formal, me parecía cosa de abracadabra. No existía ninguna imagen que conectase, al menos cualitativamente, el formalismo de Pauli con el viejo modelo atómico de Bohr.

Fue en ese momento cuando a Uhlenbeck se le ocurrió la idea de ligar el cuarto número cuántico introducido por Pauli con un momento angular intrínseco del electrón cuyo valor era $\frac{1}{2}\hbar$, el cual solo podía tomar dos orientaciones posibles en presencia de un campo magnético externo. En palabras de Uhlenbeck:

> Fue entonces cuando se me ocurrió que, puesto que (tal y como había aprendido) cada número cuántico corresponde a un grado de libertad del electrón, el cuarto número de Pauli debía estar relacionado directamente con un grado adicional de libertad. [...] En otras palabras, el electrón debía estar rotando.

El siguiente paso fue proporcionar una explicación al valor del factor giromagnético del electrón (el famoso factor de Landé): $g=2$. Ehrenfest mostró a sus jóvenes estudiantes un antiguo trabajo de Max Abraham (1875-1922) en el que se demostraba que un electrón, descrito como un sistema esférico rígido con la carga distribuida uniformemente sobre su superficie, conducía al valor 2 del factor giromagnético. Este resultado proporcionaba un significado físico al valor (adecuado) del factor g, y por ello produjo una gran sensación de euforia en Uhlenbeck y Goudsmit, quienes estaban convencidos de la importancia de su descubrimiento. Sin embargo, al mismo tiempo, no podían entender que sus ideas no se les hubiesen ocurrido antes a ninguna de las grandes autoridades de la teoría cuántica. Por alguna razón desconocida para ellos, algo tenía que carecer de sentido. Por dicho motivo, comunicaron sus conclusiones a Ehrenfest, pero decidieron no publicar, de momento, sus resultados. Ehrenfest pidió consejo a Lorentz quien, haciendo uso de la teoría clásica del electrón, mostró que la imagen de Uhlenbeck y Goudsmit, con el movimiento de rotación y la distribución superficial de la carga en el electrón, conducía a profundas inconsistencias. Por una parte, la velocidad de rotación en la superficie del electrón era mucho mayor que la velocidad de la luz, y por otra, la energía magnética asociada al electrón requería un tamaño del mismo tan grande que no tenía ningún sentido. Estos resultados convencieron definitivamente a Goudsmit y Uhlenbeck de que no debían publicar sus ideas, y así se lo comunicaron a Ehrenfest. Años después, el propio Uhlenbeck recordó la contestación de su profesor: «Ya envié a publicar su trabajo hace semanas y aparecerá en la revista la próxima semana. Bien, ustedes son aún jóvenes y se pueden permitir alguna estupidez».

El trabajo de Goudsmit y Uhlenbeck apareció publicado en la revista *Naturwissenschaften* el 20 de noviembre de 1925. Se trataba de una sola página en la que se introducía la idea de un momento angular intrínseco para el electrón ligado al cuarto número cuántico introducido por Pauli, y cuya imagen clásica era el de una pequeña esfera cargada que rotaba en torno a su propio eje (figura 1, pág. siguiente).

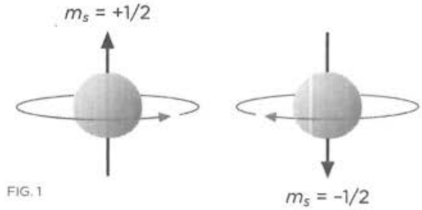


FIG. 1

La imagen semiclásica del espín, con el momento angular asociado al movimiento de rotación del electrón sobre su propio eje.

Obsérvese que el concepto de espín surgió de una extraña mezcla entre el razonamiento clásico y las reglas cuánticas. En este sentido, el trabajo de Goudsmit y Uhlenbeck, que fue posterior al trabajo seminal de Heisenberg que marcó el nacimiento de la mecánica cuántica, siguió los pasos y el procedimiento de la vieja teoría cuántica, la teoría de Bohr-Sommerfeld. Al poco tiempo de la publicación del artículo de Uhlenbeck y Goudsmit, este último recibió una carta de Heisenberg en la que le felicitaba por su «atrevido» trabajo y le preguntaba cómo habían resuelto el famoso problema del factor 2 en la estructura fina del átomo de hidrógeno. Goudsmit y Uhlenbeck tuvieron que reconocer que ni siquiera habían pensado en dicho problema, y cuando lo hicieron (tras la carta de Heisenberg) no pudieron encontrar ninguna respuesta. La solución a este problema tuvo que esperar hasta el año siguiente, 1926, cuando el joven físico inglés de Cambridge, Llewellyn H. Thomas (1903-1992), pudo explicar dicho factor haciendo uso de la teoría de la relatividad y considerando cuidadosamente la transformación entre los sistemas de referencia asociados al electrón y al núcleo atómico.

PAULI Y EL ESPÍN

La idea del espín se extendió rápidamente entre la comunidad de físicos produciendo reacciones muy encontradas. Es famoso el viaje en tren que realizó Niels Bohr en diciembre de 1925 para asistir, en la Universidad de Leiden, a la ceremonia que se organizó para celebrar el jubileo de oro de Lorentz. Durante dicho viaje, Bohr comentó sus encuentros con sus colegas y las discusiones que mantuvieron sobre la nueva idea del espín. En general, la actitud fue de expectación, cuando no de rechazo. El mismo Bohr mencionó a Pauli y a Stern, durante su parada en Hamburgo, que la idea del espín le parecía muy interesante; una expresión usada

habitualmente por Bohr para indicar que una teoría era errónea. Algo más tarde, en Leiden, Ehrenfest comunicó a Bohr que el problema del campo magnético del electrón había sido resuelto por Einstein al aplicar la teoría de la relatividad. Esta explicación fue inmediatamente aceptada por Bohr, convirtiéndose a partir de ese momento en uno de los físicos que apoyaron más decididamente la teoría de Uhlenbeck y Goudsmit. De hecho, Bohr convenció a sus jóvenes colegas para que escribiesen un segundo artículo más detallado sobre su trabajo (el mismo Bohr participó directamente en su redacción). Bohr explicó sus ideas a sus dos alumnos más aventajados, Heisenberg y Pauli, recibiendo de ellos reacciones muy diversas. Mientras Heisenberg seguía manteniendo una actitud reservada, informando además a Bohr de que ya había oído antes sus argumentaciones (aunque no recordaba dónde ni quién las había realizado), Pauli, por el contrario, mostró una actitud muy negativa, de rechazo total. Llegó a expresar que las explicaciones de Bohr eran una muestra más de la «herejía de Copenhague».

¿A quién se refería Heisenberg con su comentario? La situación se aclaró en marzo de 1926, cuando Kramers recibió una carta de un joven físico, Ralph Kronig (1904-1955), comunicándole que, varios meses antes del trabajo de Uhlenbeck y Goudsmit, él mismo desarrolló básicamente la misma idea del espín como un momento angular intrínseco del electrón. Kronig trabajó durante todo el año 1925 en Copenhague, lugar donde desarrolló sus ideas sobre el espín y donde las comentó con Heisenberg y otros colegas. Aunque, en general, la respuesta que recibió no resultó muy positiva, Kronig mencionó en la carta a Kramers que decidió finalmente no publicar sus ideas por la extrema reacción de Pauli. El mismo Kronig escribió años después que Pauli ridiculizó su teoría señalando que «ciertamente es una idea inteligente, pero por supuesto no tiene nada que ver con la realidad». Con el paso del tiempo, el propio Kronig mostró algunas reticencias frente al concepto del espín, pero a Pauli nunca le gustó que le recordasen este episodio de su vida. A pesar de ello, debe indicarse que Kronig se convirtió posteriormente en el primer profesor ayudante que Pauli tuvo en Zúrich.

Pauli persistió durante bastantes meses en su rechazo a la teoría del espín del electrón. Incluso, después del trabajo de Thomas

GEORGE UHLENBECK (1900-1988) Y SAMUEL GOUDSMIT (1902-1978)



George Uhlenbeck (a la izquierda) y Samuel Goudsmit fotografiados en 1926.

Uhlenbeck y Goudsmit fueron los físicos que introdujeron la idea del espín, uno de los conceptos más fructíferos en el desarrollo de la física en el siglo XX. George Uhlenbeck nació en Yakarta; completó sus estudios de ingeniería química en la Universidad de Delft y posteriormente se trasladó a la Universidad de Leiden para estudiar física y matemáticas. Allí conoció a Paul Ehrenfest cuya influencia resultó decisiva en el desarrollo de su vida científica. Durante el periodo 1922-1925 residió en Roma trabajando como tutor privado de uno de los hijos del embajador holandés. En Italia conoció a Enrico Fermi, con quien mantuvo una estrecha amistad durante el resto de su vida. Tras su regreso a Leiden en 1925, completó su tesis doctoral con Ehrenfest, y posteriormente, se trasladó a Estados Unidos, donde permaneció el resto de su vida. Por su parte, Samuel Goudsmit nació en La Haya en el seno de una familia judía. Comenzó sus estudios universitarios en 1919 en la Universidad de Leiden y realizó la tesis doctoral bajo la supervisión de Ehrenfest. De hecho, tanto Uhlenbeck como Goudsmit presentaron sus tesis doctorales el mismo día, el 7 de julio de 1927. Goudsmit se trasladó a Estados Unidos ese mismo año, y permaneció en dicho país el resto de su vida. Fue profesor en distintas universidades y centros de investigación, como el Laboratorio Nacional de Brookhaven (BNL), entre otros.

y su explicación del factor 2 en la estructura fina, la posición de Pauli no varió. Tras leer el manuscrito de Thomas, Pauli escribió una carta a Bohr en los siguientes términos: «En cualquier caso considero la presente publicación de Thomas en *Nature* una equivocación, una metedura de pata, y le agradecería si pudiese bloquear este trabajo o, de lo contrario, introducir en el texto las modificaciones pertinentes». Algún tiempo después, Pauli se reafirmaba aún más en su oposición a la idea del espín tras mantener varias discusiones con Goudsmit. En marzo de 1926 Pauli escri-

bió: «Hoy me ha visitado Goudsmit y hemos discutido sobre el trabajo de Thomas. Aún estoy más convencido de que todas mis objeciones son correctas». Sorprendentemente, dos meses después Pauli aceptó el resultado de Thomas y expresó: «Ahora no puedo hacer otra cosa que capitular completamente. He llegado a la convicción de que estaba equivocado en todas mis objeciones a la teoría de Thomas y sus consideraciones relativistas. [...] Debo admitir que la cuestión de la estructura fina ha sido finalmente clarificada de modo satisfactorio».

El párrafo previo evidencia las dificultades conceptuales que existían en aquellos años, provocando que, en ocasiones, se llegaran a conclusiones muy diferentes. En este sentido, Pauli, con su desmedido carácter crítico y sus comentarios mordaces y sarcásticos, tuvo una importante responsabilidad en el desarrollo de los acontecimientos e influyó en las ideas y aportaciones de sus colegas. Él mismo estuvo sometido a su implacable juicio y, por ello, llegó a cambiar completamente de opinión sobre temas diversos en pocos meses. Este aspecto de Pauli fue ampliamente comentado por muchos de sus colegas desde una doble vertiente. Así, cuando años después el físico Abraham Pais (1918-2000) comentó a Bohr que sentía verdadera lástima por Kronig en relación a su «desgraciado» episodio con Pauli, la respuesta de Bohr fue: «No, Kronig fue un idiota». Bohr señaló que uno debe publicar sus ideas cuando está seguro de las mismas sin importar nada lo que cualquier otro físico, por renombrado que sea, pueda decir. La visión era, por el contrario, algo diferente para los físicos más jóvenes. Thomas dirigió una carta a Goudsmit en marzo de 1926 en la que expresaba:

> Creo que usted y Uhlenbeck tuvieron la buena suerte de ver su teoría del espín electrónico publicada y discutida antes de que Pauli supiese de su existencia. Hace algo más de un año Kronig concibió una idea similar sobre el espín del electrón y la desarrolló; Pauli fue la primera persona a quien le mostró el trabajo. [...] Pauli le dijo que era una idea ridícula y, consiguientemente, sucedió que la primera persona que vio el trabajo de Kronig fue también la última. [...] Todo esto muestra que la infalibilidad de Dios no se ha extendido a quien se considera a sí mismo su vicario en la Tierra.

En Alemania comenzó a circular el siguiente verso: *Der Kronig hätt' den Spin entdeckt, hätt' Pauli ihn nicht abgeschreckt* («Kronig, el espín habría encontrado si Pauli no le hubiese desalentado»).

LA NUEVA TEORÍA CUÁNTICA

En mayo de 1925, dos meses después de la publicación del principio de exclusión, Pauli mostraba de nuevo una profunda frustración con el desarrollo de la teoría cuántica. Pauli escribió a un colega:

> La física se encuentra de nuevo en un punto muerto. Para mí, en cualquier circunstancia, es demasiado complicada. Ojalá fuese un actor de comedias o trabajase en cualquier otra ocupación similar, y nunca hubiese oído nada de física.

Sin embargo, la situación estaba a punto de experimentar un cambio inesperado, pero muy profundo; el joven Heisenberg publicó en julio de 1925 un trabajo que cambió definitivamente la visión de la teoría cuántica, dando lugar al nacimiento de una nueva teoría: la mecánica cuántica. Muchos de los problemas y dificultades existentes hasta entonces encontraron acomodo y solución en el marco de la nueva teoría. Pauli fue, quizá, el primer físico a quien Heisenberg informó sobre sus nuevas ideas. Lo hizo tras su regreso de la isla de Heligoland, lugar donde la nueva teoría surgió en la mente de Heisenberg. En una primera carta dirigida a Pauli, Heisenberg señalaba sus principales ideas y preocupaciones: «Mis intentos por construir una mecánica cuántica avanzan muy lentamente; pero no cejaré en ello, aunque deba alejarme totalmente de la teoría de sistemas periódicos». Tres días después, enviaba una nueva carta a Pauli en los siguientes términos: «Apenas siento interés en mi propio trabajo porque todo es aún muy confuso, y solo puedo aventurar cómo surgirá la solución. Sin embargo, las ideas básicas deben de ser correctas». A continuación, Heisenberg señalaba la idea esencial de su nueva teoría, la idea que permitió construir un nuevo mundo, y que produjo, sin duda, la mayor re-

volución en la historia de la física. «El principio es: en los cálculos de cualquier cantidad tal como la energía, frecuencia, etc., solo se pueden relacionar magnitudes que sean observables». Heisenberg expresó con claridad la senda que debía seguirse para construir la nueva teoría, una senda que se alejaba irremediablemente de la visión de la física clásica. La posición, la velocidad de un electrón en un átomo, no son cantidades observables y, por consiguiente, no pueden usarse de forma apropiada en el seno de la nueva teoría. El propio concepto de órbita electrónica, tan ampliamente usado en la vieja teoría cuántica, se difumina y pierde su significado como trayectoria del electrón en su movimiento alrededor del núcleo.

«La mecánica de Heisenberg me ha devuelto el entusiasmo por la vida.»

— Wolfgang Pauli.

Las nuevas y «revolucionarias» ideas de Heisenberg fueron recibidas por Pauli con gran satisfacción. Unos meses antes de que apareciese la publicación seminal de Heisenberg, Pauli escribió a Kramers:

> He recibido las nuevas ideas de Heisenberg con gran júbilo. [...] Con respecto a mi propia visión científica, ahora estoy convencido de que me encuentro muy próximo a Heisenberg. [...] También he notado con gran placer que Heisenberg ha adquirido con Bohr en Copenhague una nueva forma, más filosófica, de analizar los problemas, alejándose de un análisis puramente formal.

Dado el especial carácter de Pauli, no es fácil imaginar una reacción tan positiva.

Los trabajos posteriores de Born, Jordan y Heisenberg (véase el recuadro de la página siguiente) fueron recibidos por Pauli con ciertas reservas. Al contrario de lo que sucedió con las ideas germinales de Heisenberg, Pauli criticó el trabajo de sus colegas de Gotinga afirmando que «uno debería intentar liberar la mecánica de Heisenberg de la efusión de erudición de Gotinga, y expresar

EL ORDEN DE LOS FACTORES

Uno de los resultados más sorprendentes del trabajo de Heisenberg fue la no conmutatividad del producto, es decir, el producto de dos magnitudes dadas, $x \cdot y$, no era igual al producto $y \cdot x$. En otras palabras, el orden de los factores influía en el resultado obtenido. Este aspecto del trabajo de Heisenberg resultó tan inesperado que el propio Heisenberg lo consideró en un principio «cuestionable». Sin embargo, pronto se convirtió en la piedra angular de la nueva mecánica cuántica. Max Born, con quien Heisenberg trabajaba de ayudante cuando desarrolló su nueva teoría, fue el primer físico que se dio cuenta de que la nueva relación cuántica propuesta por su joven ayudante no era otra cosa que el producto de matrices y sus correspondientes relaciones de conmutación. Dos meses después del trabajo de Heisenberg, Born y su ayudante Pascual Jordan (1902-1980) escribieron el primer trabajo en el que desarrollaron el cálculo matricial aplicado a la teoría cuántica. Unos meses después, en noviembre de 1925, ambos físicos en colaboración con el propio Heisenberg enviaron a publicar un nuevo trabajo en el que establecieron los fundamentos de la nueva mecánica cuántica y mostraron todos sus detalles matemáticos. Este trabajo se conoce en la historia de la física como la «publicación de los tres hombres», y constituye lo que se denomina «mecánica cuántica matricial».

con mayor claridad la esencia de la teoría». Años después, Born recordaba su encuentro con Pauli en el tren de Gotinga a Hanóver en los siguientes términos:

> Me encontré con Pauli en su compartimento y, absorto por mi nuevo descubrimiento, le hablé sobre las matrices y mis dificultades para encontrar el valor de los elementos no diagonales. Le pregunté si le gustaría colaborar conmigo en este problema. Sin embargo, en lugar de mostrar interés, recibí por su parte una respuesta negativa, fría y sarcástica: «Sí, sé que eres aficionado al formalismo complicado y tedioso. Conseguirás malograr las ideas físicas de Heisenberg con tus fútiles matemáticas».

No debía ser fácil aceptar los comentarios de Pauli, aunque quien los recibiese supiese que no había malicia alguna en los mismos. Sin embargo, lo más incomprensible es el propio comportamiento de Pauli y sus «extrañas» decisiones. Sucedió con el espín,

y volvió a repetirse con la mecánica cuántica. Pauli supo ver la «revolución» que estaba implícita en la nueva teoría de Heisenberg, siendo incluso capaz de vislumbrar por dónde iría la nueva visión de la física cuántica. Sin embargo, no quiso participar en un primer momento en su construcción. Algunos físicos consideran que la razón real por la cual Pauli no tuvo una participación más activa en la construcción de la mecánica cuántica fue su total implicación, durante aquellos años, en el desarrollo de un nuevo artículo enciclopédico sobre la vieja teoría cuántica. El mismo Pauli señaló en octubre de 1925: «Gracias a Dios, parece que el artículo se va aproximando a su final. Espero quedar libre de esta carga en dos o tres semanas. Estoy deseando volver a una actividad científica razonable». El artículo no apareció publicado hasta julio de 1926. Este trabajo se conoce hoy día como el «El viejo testamento».

EL ÁTOMO DE HIDRÓGENO

Resulta sorprendente la mención de Pauli a cálculos «complicados y tediosos» para justificar su negativa a colaborar con Born en la formulación de la mecánica cuántica matricial. Este fue justamente el camino que Pauli siguió, unos meses después, en el estudio del espectro del átomo de hidrógeno. Tras el artículo seminal de Heisenberg y los trabajos posteriores de Born y Jordan, resultaba evidente que la nueva teoría debía ponerse a prueba en una situación real, y el problema más simple en el que se podía pensar era el del átomo de hidrógeno. No obstante, a pesar de su «aparente» simplicidad, el estudio de la estructura del átomo de hidrógeno y la determinación de su espectro en el marco de la nueva teoría resultó un verdadero desafío.

El físico inglés Paul Dirac (1902-1984), que desarrolló un formalismo alternativo a la mecánica matricial, resolvió el problema en una situación especialmente simple; un modelo atómico en dos dimensiones. Por el contrario, los intentos de Born y Heisenberg por resolver el caso real, en tres dimensiones, resultaron infructuosos. Heisenberg escribió muchos años después: «En aquel momento me

sentí muy desdichado por ser incapaz de resolver incluso el caso más simple del átomo de hidrógeno». Pauli, tras finalizar la redacción de su trabajo sobre la vieja teoría cuántica, se involucró completamente en el problema, y en unos meses, el 17 de enero de 1926, envió a publicar el trabajo titulado «Sobre el espectro de hidrógeno desde el punto de vista de la nueva mecánica cuántica». Dos meses antes, Heisenberg era ya partícipe de los principales resultados obtenidos por Pauli, a quien expresó su felicitación más sincera: «No necesito decirte cuánto me he alegrado con tu nueva teoría del átomo de hidrógeno, y cuánto admiro lo que has conseguido con esta teoría en un plazo de tiempo tan breve».

El trabajo de Pauli fue, en palabras del físico e historiador Abraham Pais, un verdadero *tour de force*. Pauli no solo mostró que había asimilado y comprendido completamente el formalismo matricial de la mecánica cuántica, sino que desarrolló técnicas y métodos específicos de cálculo para poder explicar la estructura del átomo de hidrógeno. Pauli describió el espectro discreto de energías, así como el desdoblamiento de niveles debido a la presencia de un campo eléctrico (un fenómeno que se conoce como «efecto Stark»). Ambos resultados, que ya habían sido descritos de forma satisfactoria por la teoría de Bohr-Sommerfeld, fueron confirmados por la nueva teoría cuántica, demostrándose así su poder predictivo. Sin embargo, Pauli fue mucho más allá, y pudo explicar también resultados para los cuales la vieja teoría cuántica había fracasado completamente.

Sin embargo, un aspecto que Pauli no consideró en su trabajo fue el espín del electrón. En aquel momento la idea del espín era aún criticada por numerosos físicos, y el propio Pauli era uno de los que se oponían con más intensidad a la misma. No obstante, en la última sección del artículo escribió:

> Si esta suposición del espín, junto con la nueva mecánica, es suficiente para explicar y describir todos los datos experimentales es aún cuestionable. Solo podremos tener una respuesta clara cuando el cálculo de la estructura fina relativista sea realizado sobre la base de la nueva mecánica. De momento, este estudio está más allá de nuestras posibilidades actuales.

Pauli hacía referencia al famoso factor 2 necesario para que la teoría estuviese de acuerdo con el experimento. Este es el factor que finalmente Thomas explicó haciendo uso de la teoría de la relatividad, pero que Pauli solo aceptó en marzo de 1926, aproximadamente cuatro meses después de haber escrito su artículo sobre el átomo de hidrógeno.

El trabajo de Pauli recibió una respuesta muy positiva por parte de la mayoría de físicos de la época (el mismo Bohr se mostró entusiasmado) y fue considerado como una muestra inequívoca de la validez y potencial de la nueva teoría cuántica. Con ella no solo pudieron reproducirse todos los resultados previos, sino que se explicaron muchos otros desconocidos, o sobre los cuales aún no se había podido encontrar una descripción razonable. De este modo, la mecánica cuántica hizo posible que las profundas dificultades e inconsistencias que habían nacido al intentar describir el mundo subatómico con la vieja teoría de Bohr-Sommerfeld comenzasen a difuminarse, y con el tiempo, llegasen a desaparecer completamente.

SCHRÖDINGER: LA MECÁNICA ONDULATORIA

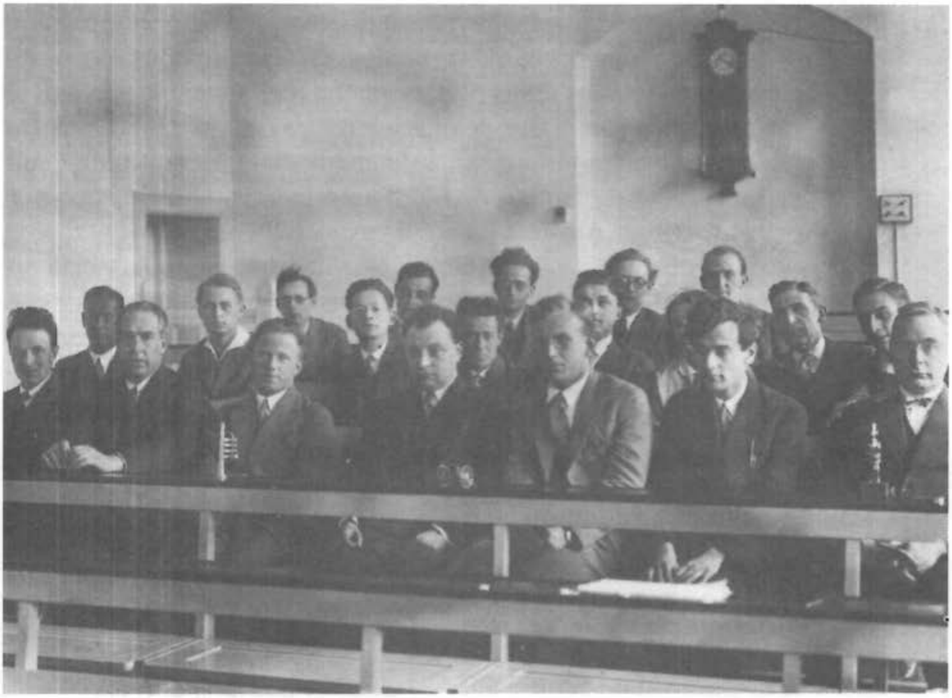
El foco de atención de la teoría cuántica se desplazó de forma repentina e inesperada de Gotinga y Hamburgo a Zúrich (Suiza). Allí un físico vienés, que hasta entonces solo había tenido una participación menor en la teoría cuántica, desarrolló un nuevo enfoque, un nuevo formalismo que atrajo inmediatamente la atención de la mayoría de sus colegas. El autor del trabajo, titulado «Cuantización como un problema de valores propios», fue Erwin Schrödinger. Esta publicación y otras que siguieron en los meses siguientes (primavera-verano de 1926) constituyeron la base de lo que terminó denominándose «mecánica cuántica ondulatoria» en contraste con la mecánica cuántica matricial desarrollada por Heisenberg, Born y Jordan.

Schrödinger reconoció que su nueva teoría estuvo inspirada por los trabajos previos sobre estadística de Einstein y Bose, y

sobre todo, por el trabajo del físico francés De Broglie con su hipótesis de la dualidad onda-corpúsculo. Schrödinger escribió en su primer artículo: «Deseo mencionar sobre todo que fui conducido a estas deliberaciones, en primer lugar, por los sugerentes artículos de M. Louis de Broglie». Otro físico que tuvo una participación directa en la génesis de las nuevas ideas de Schrödinger fue Peter Debye. Felix Bloch (1905-1983), en aquellos años estudiante en el Instituto Politécnico de Zúrich (el famoso ETH), recordaba los seminarios conjuntos que organizaban esta institución y la universidad, y escribió:

> En cierta ocasión oí a Debye dirigirse a Schrödinger en los siguientes términos: «Puesto que no se encuentra trabajando ahora en ningún problema importante, ¿por qué no nos habla en alguna ocasión sobre la tesis de De Broglie?». Algún tiempo después, Schrödinger impartió un seminario maravilloso sobre la hipótesis de De Broglie, mostrando además cómo podían obtenerse las reglas de cuantización exigiendo simplemente que se incluyese un número entero de ondas en una órbita estacionaria. Tras el seminario, Debye comentó que una de las cosas que había aprendido con Sommerfeld era que, para describir apropiadamente las ondas, uno necesitaba una ecuación de ondas. Algunas semanas después, Schrödinger volvió a dar un nuevo seminario que comenzó con las siguientes palabras: «Mi colega Debye sugirió que se debería tener una ecuación de ondas; bien, yo he encontrado una».

La ecuación de ondas de Schrödinger se convertiría con el tiempo en la esencia, en el propio corazón de la teoría cuántica, y en una de las ecuaciones más famosas de la física. Al contrario que la teoría de Heisenberg y sus colegas de Gotinga, con el complicado formalismo de operadores y cálculo matricial, en la teoría de Schrödinger el ingrediente esencial era la ecuación de ondas: una ecuación diferencial en las coordenadas espaciales y temporal, y cuya incógnita era una función $\psi(\vec{r},t)$, de significado físico aún muy incierto. La imagen de Schrödinger resultó mucho más atractiva que la de Heisenberg, y por ello, una gran mayoría de los físicos de la época mostraron un gran alivio; no solo la nueva teo-



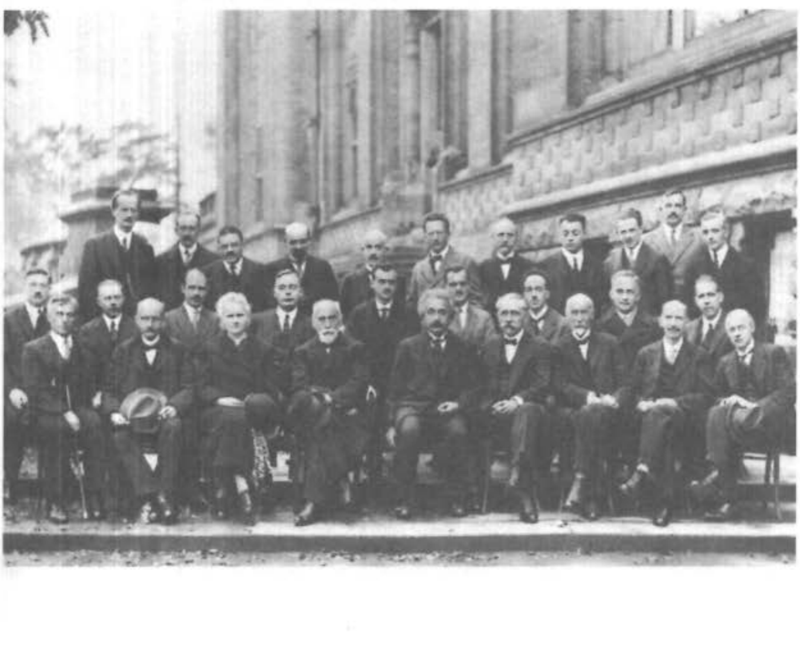


FOTO SUPERIOR:
Una foto tomada en el Instituto Niels Bohr en 1930; en primera fila, de izquierda a derecha, Oscar Klein, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, George Gamow, Lev Landau y Hans Kramers.

FOTO INFERIOR:
Los asistentes a la Conferencia Solvay de 1927. En la última fila: Heisenberg (el tercero por la derecha), Pauli (el cuarto) y Schrödinger (el sexto).

ría podía visualizarse mejor, sino que los propios cálculos resultaban considerablemente más sencillos. En aquellos años, la resolución de ecuaciones diferenciales estaba mejor establecida que la manipulación algebraica de operadores y el cálculo matricial. De hecho, los resultados que tan arduamente había conseguido Pauli en su estudio del átomo de hidrógeno fueron reproducidos por Schrödinger sin ninguna dificultad especial.

La ecuación de Schrödinger es consistente con la teoría no relativista. No obstante, Schrödinger era plenamente consciente de la importancia de los efectos relativistas y, por ello, la primera ecuación que realmente obtuvo involucraba la dinámica relati-

SCHRÖDINGER Y LA ECUACIÓN DE ONDA



Erwin Schrödinger, nacido en Viena en 1887, realizó sus estudios universitarios en la capital austriaca y en 1914 consiguió la habilitación. Tras la Primera Guerra Mundial, fue nombrado profesor ayudante de Max Wien en Jena. En 1922 fue nombrado catedrático de Física en la Universidad de Zúrich. En este centro desarrolló su nuevo formalismo de la teoría cuántica. El impacto de su trabajo fue tal que el propio Planck le recomendó para que fuese su sucesor en la Universidad de Berlín, puesto que Schrödinger ocupó en 1927. En 1933, tras la victoria de Hitler en las elecciones, abandonó Alemania y se trasladó a Oxford. Ese mismo año le fue concedido el premio Nobel, que compartió con el físico inglés Paul Dirac. Finalmente, tras diversas estancias en Estados Unidos, se trasladó a Dublín, donde permaneció hasta su retiro, adquiriendo además la nacionalidad irlandesa.

La ecuación y la función de onda

La ecuación de Schrödinger es una ecuación diferencial en las variables espaciales y temporal, que se expresa en la forma siguiente:

vista. Sin embargo, Schrödinger nunca publicó dicha ecuación, hoy conocida como «ecuación de Klein-Gordon», al no ser capaz de reproducir la constante de estructura fina del átomo de hidrógeno. El nacimiento de una versión completamente relativista para la ecuación de ondas del electrón tuvo aún que esperar unos dos años, hasta principios de 1928, cuando Paul Dirac dio a conocer su famosa ecuación. Otro aspecto de la ecuación de Schrödinger es que no incluía ninguna dependencia con la nueva propiedad del espín. Este no constituía un problema serio en aquellos momentos; la mayoría de los físicos consideraban que el espín estaba íntimamente relacionado con la relatividad, y puesto que la ecua-

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}=\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta+V\right)\psi,$$

donde t representa la variable temporal; $\hbar\equiv\frac{h}{2\pi}$ es la constante de Planck reducida; m, la masa de la partícula; V, el potencial de interacción que siente la misma, y Δ el operador laplaciano que viene dado en función de las derivadas segundas espaciales. Así pues, la ecuación de Schrödinger describe la evolución temporal de una función matemática ψ cuyo significado físico en un primer momento era muy difuso. En todo caso, la ecuación de ondas indica que toda la información física sobre el sistema analizado se halla contenida en la función ψ. Por otra parte, la ecuación previa es consistente con la expresión clásica no relativista de la energía:

$$E=\frac{p^2}{2m}+V$$

(p es el momento lineal cinético). Schrödinger fue muy consciente de esta limitación; sin embargo, pudo describir numerosas propiedades cuánticas de modo mucho más simple que la mecánica matricial. A pesar de su indiscutible éxito, la interpretación del significado físico de la función de onda fue objeto de discusión durante muchos años, y la interpretación probabilística introducida por Born nunca fue aceptada por Schrödinger. Este expresó durante el resto de su vida sus objeciones y reticencias a dicha interpretación buscando siempre argumentos que pudiesen mostrar lo que él mismo consideraba una «falacia»: la interpretación de Copenhague.

ción de Schrödinger no incluía ningún aspecto relativista, no era extraño que no tuviese ninguna dependencia con el espín. Como se mostrará más adelante, fue Pauli quien consiguió incorporar el espín en el seno de la teoría de Schrödinger.

PAULI Y LA MECÁNICA ONDULATORIA

Pauli recibió con júbilo la nueva teoría de Schrödinger. En una carta dirigida a Jordan expresó: «Creo que este trabajo debe ser considerado entre los más importantes escritos recientemente. Léalo atentamente y con devoción». Viniendo de Pauli, el comentario no podía ser más elogioso. No obstante, inmediatamente surgió la cuestión: ¿qué relación existe entre las dos teorías? Ambas eran capaces de explicar y describir el espectro del átomo de hidrógeno, pero, indudablemente, eran visiones y formalismos muy distintos. Todos los físicos de la época eran plenamente conscientes de la necesidad de encontrar una conexión, una razón que permitiese clarificar ambas imágenes del mundo cuántico.

Einstein, muy crítico con la teoría cuántica en aquellos años, realizó el siguiente comentario: «Hasta ahora no hemos tenido una verdadera teoría cuántica, y ahora nos encontramos de pronto con dos. Estarán de acuerdo conmigo que las dos teorías se excluyen mutuamente. ¿Cuál es la correcta? Quizá, ninguna de ellas lo sea». Sin embargo, en marzo de 1926, solo dos meses después del primer artículo de Schrödinger, este mismo y Pauli, de forma casi simultánea, comprobaron la equivalencia formal entre ambos formalismos. Este trabajo fue enviado por Schrödinger a la revista *Annalen der Physik* el 18 de marzo de 1926, apareciendo publicado el 4 de mayo. Por el contrario, la demostración de Pauli sobre la equivalencia entre ambas teorías fue comunicada en una carta dirigida a Jordan el 12 de abril. Así pues, no parece que ninguno de los dos físicos conociese el trabajo que había realizado el otro. No obstante, ante la aparición del artículo de Schrödinger, Pauli decidió no publicar su trabajo, aunque siempre guardó una copia de la carta que había escrito a Jordan.

Los trabajos de Schrödinger y su demostración de la equivalencia entre las dos visiones de la teoría cuántica fueron afianzando cada vez más la mecánica ondulatoria, a pesar de las fuertes críticas que recibió por parte de Born y Heisenberg. Este último escribió a Pauli en junio de 1926: «Cuanto más pienso en la parte física de la teoría de Schrödinger, más abominable la encuentro. Lo que Schrödinger escribe acerca de la claridad a duras penas tiene sentido; en otras palabras, pienso que es basura. El mayor resultado de su teoría es el cálculo de los elementos de matriz». Es difícil imaginar que el párrafo previo fuese escrito por Heisenberg, un físico que siempre fue extremadamente cuidadoso y respetuoso en sus críticas a los trabajos de sus colegas; más bien, parece el típico comentario asociado al siempre cáustico y mordaz Pauli.

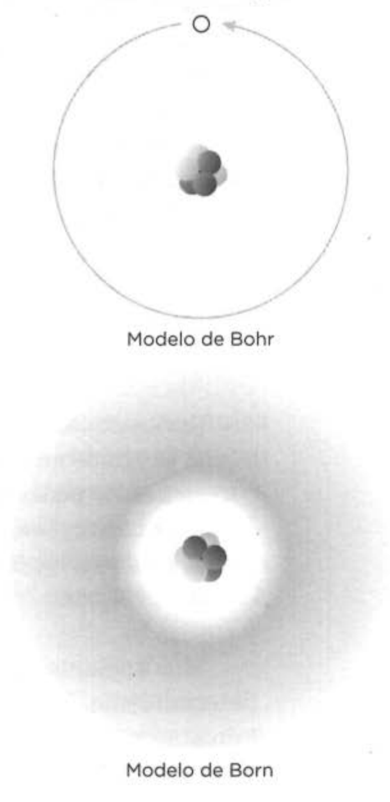
En todo caso, la teoría de Schrödinger aún debía proporcionar una respuesta adecuada a la siguiente cuestión: ¿qué significado físico tiene la función de onda? Schrödinger intentó hallar una respuesta, pero sus ideas fueron rápidamente cuestionadas por sus colegas. Sorprendentemente, la aportación más relevante, la explicación que resultó decisiva siendo aceptada por la mayor parte de la comunidad científica, vino de uno de los padres de la mecánica matricial, Max Born. En junio de 1926 Born envió a la revista *Zeitschrift für Physik* el artículo titulado: «Sobre la teoría cuántica de las colisiones». En el mismo, Born señaló que el módulo al cuadrado de la función de onda, es decir, $|\psi|^2$, representaba la densidad de probabilidad de los electrones (figura 2).

Born expresó claramente sus diferencias con la interpretación que introdujo Schrödinger:

Ilustración de las órbitas electrónicas de acuerdo con el modelo de Bohr (parte superior de la figura) y la interpretación probabilística introducida por Born (parte inferior).

FIG. 2

Átomo de hidrógeno



Schrödinger estaba convencido de que su teoría ondulatoria hacía posible un retorno a la física clásica determinista, y propuso abandonar el modelo de partículas y considerar los electrones como una distribución continua de densidades. Por el contrario, a la vista de los hechos experimentales, al grupo de Gotinga esta interpretación nos parecía inaceptable. En aquel tiempo ya era posible contar partículas y fotografiar sus trayectorias a través de los centelleadores o contadores de tipo Geiger y las cámaras de niebla.

La interpretación de Born se conoce hoy día como «interpretación probabilística» de la teoría cuántica, o simplemente, interpretación de Copenhague. Esto es un simple reflejo de la aceptación incondicional que dicha teoría tuvo por parte de los físicos de la escuela de Gotinga-Copenhague, Pauli entre ellos. Por el contrario, otros físicos insignes, siendo los más representativos Einstein y el mismo Schrödinger, nunca aceptaron la interpretación de Born. No deja de resultar extraño que la idea germinal de Born estuviese basada en gran medida en trabajos previos que el propio Einstein había realizado en relación a la teoría de De Broglie y su postulado de la dualidad onda-corpúsculo. Born, desde el mismo momento de la publicación de su trabajo, fue consciente de las dificultades conceptuales que su interpretación *probabilística* de la función de onda traía consigo. Él mismo escribió:

> [La mecánica cuántica de Schrödinger] da una respuesta definida al efecto de una colisión; pero no hay lugar para una descripción causal. No podemos contestar a la pregunta: ¿cuál es el estado después de la colisión?; solamente podemos encontrar una respuesta a la cuestión ¿cuán probable es un resultado determinado después de la colisión?

Más adelante, Born señaló: «Aquí surge todo el problema del determinismo. [...] Yo me siento inclinado a abandonar el determinismo en el mundo de los átomos. Pero esta es una cuestión filosófica, para la cual no solo son decisivos los argumentos físicos». La interpretación de Copenhague condujo a profundas dis-

cusiones sobre la fundamentación de la teoría cuántica, discusiones que se extendieron durante muchos años.

En octubre de 1927 tuvo lugar en Bruselas la quinta edición de las famosas Conferencias Solvay. Esta edición ha pasado a la historia por el acalorado debate que surgió entre Bohr y Einstein. Mientras Bohr se erigió en el máximo representante de la interpretación probabilística, lo que se ha denominado «interpretación ortodoxa de la teoría cuántica», Einstein no pudo aceptar en ningún momento las implicaciones filosóficas que dicha imagen traía consigo, y todo su objetivo durante la conferencia fue encontrar argumentos o proponer experimentos en los que la interpretación de Born resultase completamente falaz. Muchos años después, recordando dicha conferencia, Stern señaló: «Pauli y Heisenberg no mostraron ningún interés especial ante las argumentaciones de Einstein». Pauli aceptó desde el primer momento la interpretación de Born y aplicó dicha idea al estudio de sistemas complejos constituidos por un número N de partículas. Asimismo, llevó a cabo la primera aplicación de la mecánica cuántica al estudio de moléculas. Pauli criticó en más de una ocasión la posición de total rechazo mantenida por Einstein y Schrödinger.

LA MECÁNICA CUÁNTICA SE CONSOLIDA

Las ideas básicas que terminaron por consolidar la mecánica cuántica como una teoría física perfectamente coherente fueron introducidas durante el año 1927. En marzo, Heisenberg envió a publicar su trabajo: «Sobre el contenido intuitivo de la cinemática y mecánica cuántica», en el que se introducían por primera vez las famosas relaciones de indeterminación (o incertidumbre):

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \text{ y } \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2},$$

que establecen una limitación fundamental en la precisión con la cual pares de variables —tales como la posición y el momento o la energía y el tiempo— pueden ser determinadas. El princi-

pio de Heisenberg, al igual que sucede con el de exclusión de Pauli, constituye uno de los principios básicos de la física. Sin él resultaría imposible describir y entender el proceso de interacción entre partículas y entre estas y la radiación. Sin embargo, la incorporación de la teoría relativista en el mundo cuántico trajo consigo numerosos problemas y dificultades. Hubieron de transcurrir muchos años para encontrar soluciones y respuestas coherentes, pero el principio de incertidumbre de Heisenberg siempre se mantuvo como un pilar sólido, un concepto esencial que trascendió la propia teoría cuántica no relativista mostrando toda su razón de ser en el contexto de la teoría cuántica de campos (véase el capítulo 6).

Al igual que sucedió con el trabajo seminal sobre la mecánica cuántica, Pauli fue el primer físico a quien Heisenberg informó sobre sus relaciones de incertidumbre. Heisenberg escribió: «La reacción de Pauli fue mucho más positiva de lo que había esperado. [...] [Esto] me animó a escribir y publicar los contenidos de todas estas consideraciones». Las relaciones de indeterminación de Heisenberg también fueron el punto de partida para que Bohr elaborase su principio de complementariedad. Este principio, que algunos físicos criticaron por considerarlo demasiado *filosófico* y falto de rigor matemático, fue descrito por primera vez en una carta que Bohr envió a Pauli en agosto de 1927. La primera referencia pública de Bohr al mismo se produjo durante la famosa conferencia del lago Como (Italia) en septiembre de 1927. Bohr describió el principio en los siguientes términos:

> La verdadera naturaleza de la teoría cuántica [...] nos fuerza a considerar las coordenadas espacio-temporales y el principio de causalidad, la unión de los cuales caracteriza las teorías clásicas, como hechos complementarios, pero exclusivos de la descripción, simbolizando la idealización de la observación y la definición, respectivamente.

Puede apreciarse el estilo rebuscado y oscuro de Bohr. No resulta extraño que Dirac, siempre caracterizado por su afán de precisión y claridad conceptual, criticase en términos muy duros

el principio de complementariedad. El propio Bohr reelaboró su principio durante años intentando encontrar una presentación suficientemente clara y precisa.

Un último aspecto necesario para que la teoría cuántica no relativista se consolidase como una teoría perfectamente coherente fue la incorporación en la misma del espín y, consecuentemente, del principio de exclusión de Pauli. En 1926, en diversos trabajos publicados por Enrico Fermi (1901-1954), Dirac y Heisenberg, se había mostrado que el principio de exclusión parecía estar íntimamente relacionado con la propiedad de antisimetría de las funciones de onda que describían el movimiento de los electrones. En otras palabras, la función de onda que describía el sistema de electrones debía ser completamente antisimétrica (debía cambiar de signo) bajo el intercambio de las variables que caracterizaban a dichos electrones. El espín era un ingrediente básico en la descripción del comportamiento de los electrones; por consiguiente, su incorporación en la descripción del sistema cuántico como nuevo grado de libertad resultaba esencial. Sin embargo, a principios de 1927 aún no estaba claro cómo incorporar dicha propiedad en la ecuación de onda de Schrödinger extendiendo el espacio de configuración del electrón. Fue Pauli quien llevó a cabo tal tarea, desarrollando una teoría que se ha mantenido desde entonces como el marco general en el cual describir el espín y que se conoce actualmente como «la teoría no relativista del espín».

LA TEORÍA DE PAULI DEL ESPÍN

Durante meses Pauli no pudo aceptar que el espín, la propiedad asociada al nuevo número cuántico que hubo de introducirse para explicar la configuración de la materia, pudiese interpretarse como un momento angular asociado al movimiento de rotación del electrón sobre sí mismo. Esta imagen *semiclásica*, procedente del significado asociado al momento angular orbital, le parecía completamente cuestionable. El espín era una propiedad puramente cuántica, sin analogía con el mundo clásico, pero que re-

sultaba fundamental para entender el comportamiento del mundo subatómico. Así pues, el espín no podía depender de los grados de libertad espaciales, sino que él mismo era un nuevo grado de libertad independiente de coordenadas y momentos. Sin embargo, lo realmente importante en la teoría de Uhlenbeck y Goudsmit fue interpretar el espín como una propiedad intrínseca del electrón que podía ser descrita como un momento angular. Esta es la imagen que terminó aceptando Pauli, y a partir de la cual construyó su teoría del espín.

«He notado que beber vino me hace mucho bien. Tras una segunda botella de vino o champán generalmente me convierto en una compañía muy agradable, algo que nunca sucede cuando estoy completamente sobrio.»

— Wolfgang Pauli.

La ecuación de Schrödinger está definida exclusivamente en el espacio de coordenadas y, por consiguiente, la función de onda depende únicamente de las coordenadas espaciales y temporal: $\psi(\vec{r},t)$. El espín no aparece explícitamente y debe añadirse *ad hoc* como un nuevo grado de libertad. Sin embargo, ¿cómo incorporarlo consistentemente en la teoría de Schrödinger de modo que proporcione una explicación a las numerosas evidencias experimentales que requieren su presencia (el experimento de Stern-Gerlach, el efecto Zeeman anómalo, etc.)? Este fue el problema que Pauli se planteó en 1927, dando lugar a uno de sus trabajos más significativos: «Sobre la mecánica cuántica del electrón magnético». En el mismo, Pauli criticó las ideas elaboradas unos meses antes por el físico inglés Charles Galton Darwin (1887-1962), nieto del gran biólogo, en las que asociaba el espín con una función de onda de tipo vector con dos componentes. Pauli señaló que la imagen de Darwin conducía a serias dificultades con el carácter bivaluado del espín. Una vez más, la crítica de Pauli es difícil de comprender, puesto que su teoría no era tan distinta, aunque sí mucho más completa y consistente que la de Darwin.

Pauli describió el espín del electrón como un momento angular intrínseco e introdujo las componentes del espín en las tres direcciones del espacio: S_x, S_y, S_z. Puesto que la proyección del espín solo podía tomar dos valores, $\pm\frac{\hbar}{2}$, los operadores de espín venían dados como operadores matriciales 2×2, y la función de onda debía ser de tipo vector con dos componentes (nótese la similitud con la imagen de Darwin). Por otra parte, Pauli señaló que los tres operadores de espín debían satisfacer las relaciones generales de conmutación del momento angular, es decir, $[S_x, S_y]=S_x S_y - S_y S_x = iS_z$, y cualquier otra permutación cíclica. Así pues, la formulación del espín era formalmente análoga a la del momento angular orbital, aunque ambos operadores actuaban sobre espacios diversos; mientras el momento cinético estaba definido en el espacio de coordenadas y momentos, el espín no tenía ninguna dependencia en dichas variables. Además, las dos componentes de la función de onda, cada una de ellas dependiente de las coordenadas espacio-temporales, estaban directamente relacionadas con los dos posibles valores del nuevo número cuántico m_s (proyección del espín). Pauli expresó los tres operadores de espín en la forma siguiente:

$$S_i = \frac{\hbar}{2}\sigma_i,$$

donde el índice i se refiere a cualquiera de las tres componentes: x, y, z; y el término σ_i representa las hoy denominadas matrices de Pauli:

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Obsérvese que las matrices de Pauli satisfacen las relaciones de conmutación señaladas anteriormente. Una vez definidos los operadores de espín, el siguiente paso de Pauli fue aplicar su teoría al átomo de hidrógeno. Puesto que el electrón posee un momento angular intrínseco (el espín), este puede acoplarse con cualquier campo magnético externo. Dicho acoplamiento vendría dado simplemente por un nuevo término en la ecuación

ACOPLAMIENTO ESPÍN-ÓRBITA

Considérese un electrón, con su momento magnético intrínseco de espín $\vec{\mu}_s$, en presencia de un campo magnético $\vec{B}$. Pauli reescribió la ecuación de onda de Schrödinger añadiendo un nuevo término relacionado con el acoplamiento entre ambas magnitudes. Así pues, la ecuación resulta:

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}=\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta+V-\vec{\mu}_s\cdot\vec{B}\right)\psi.$$

El momento magnético de espín del electrón viene dado en función del vector espín $\vec{S}$ en la forma:

$$\vec{\mu}_s=\frac{2\mu_B}{\hbar}\vec{S},$$

donde μ_B es el magnetón de Bohr (véase el capítulo 1). En el caso del átomo de hidrógeno el campo magnético sentido por el electrón se debe a la presencia del núcleo atómico (un solo protón en este caso). Haciendo uso de la teoría electromagnética clásica, el campo magnético puede expresarse directamente en función del campo eléctrico sentido por el electrón y su velocidad orbital:

$$\vec{B}=\frac{1}{c^2}\left(\vec{v}\times\vec{E}\right).$$

El término c denota la velocidad de la luz en el vacío. Así pues, obsérvese que el campo magnético es una simple corrección respecto a la intensidad

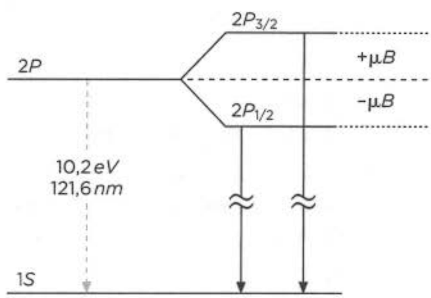
de Schrödinger que contuviese el producto del campo magnético que siente el electrón y su momento magnético de espín. Así pues, Pauli determinó el campo magnético sentido por el electrón debido a la presencia del núcleo atómico (hidrógeno), comprobando que la presencia del espín conducía a un término de interacción con el propio momento angular orbital del electrón. Este es el famoso término de interacción espín-órbita necesario para explicar numerosas evidencias experimentales (véase recuadro).

A pesar del éxito incuestionable de la teoría de Pauli, este era muy consciente de los límites de la misma. Básicamente, el problema esencial residía en que la teoría no era consistente con la relatividad. El mismo Pauli señaló que era necesario in-

del campo eléctrico. Por último, dicho campo eléctrico se puede estimar fácilmente a partir del potencial electrostático. Recordemos que se considera simplemente un sistema con simetría esférica; por lo tanto, el potencial solo depende de la variable radial. La expresión final para el término de acoplamiento entre el momento magnético de espín del electrón y el campo magnético para el átomo de hidrógeno resulta:

$$\vec{\mu}_s \cdot \vec{B} = \frac{2\mu_B}{mec^2\hbar}\frac{1}{r}\frac{dV}{dr}\vec{S}\cdot\vec{L},$$

donde V es el potencial electrostático; e, la carga del electrón, y $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$, el momento angular orbital del electrón. La expresión previa corresponde al término de interacción espín-órbita. Sin embargo, para describir el desdoblamiento de las líneas espectrales es necesario introducir un factor adicional 1/2 relacionado con la transformación entre los sistemas de referencia asociados al electrón y núcleo, respectivamente, y cuya justificación fue proporcionada por Thomas. La interacción espín-órbita explica el desdoblamiento en energía que se observa en la figura.



cluir términos de orden superior en su ecuación para mantener una descripción satisfactoria del momento magnético del electrón. Pauli supo diagnosticar el problema: «Se debe requerir que la teoría final se formule en una forma invariante relativista y que además permita realizar cálculos de orden superior»; sin embargo, fue incapaz de encontrar dicha formulación: «Hasta el momento no he sido capaz de llegar a una formulación invariante relativista de la mecánica cuántica del electrón». Este logro estaba reservado a Dirac, quien construyó una ecuación general consistente con los principios fundamentales de las dos grandes teorías del siglo XX: la teoría relativista y la mecánica cuántica. El espín surgió entonces como una consecuencia natural de la propia ecuación.

EL FINAL DE UN PERÍODO

Los años en Hamburgo fueron, en palabras del propio Pauli, «un período maravilloso», unos años en los que el físico vienés desarrolló algunos de sus trabajos más originales. La Universidad de Hamburgo se convirtió también en un centro fundamental en el desarrollo de la teoría cuántica. Pauli coincidió con grandes investigadores y profesores con los que mantuvo una colaboración científica muy estrecha: Gregor Wentzel (1898-1978), Wilhelm Lenz (1888-1957), Otto Stern (1888-1969), Walter Baade (1893-1961), etc. Sin embargo, no solo la actividad científica atrajo la atención de Pauli en aquellos años, ya que otros aspectos de su *educación* y *formación* también fueron cultivados de modo especial. Así, el mismo Pauli señaló muchos años después: «Cuando llegué a Hamburgo pasé, bajo la influencia de Stern, directamente del agua mineral al champán».

En el plano científico, el aspecto más destacado del período de Hamburgo fue la relación que Pauli estableció con el físico experimental Otto Stern. El físico estadounidense, Isidor Isaac Rabi (1898-1988), que visitó Hamburgo durante 1927, escribió muchos años después:

> La Universidad de Hamburgo en aquellos años era uno de los centros más importantes de Alemania en física. [...] Lo que caracterizaba la física en Hamburgo era la estrecha colaboración entre Stern y Pauli, experimentación y teoría. Algunas de las grandes contribuciones teóricas de Pauli tuvieron su origen en sugerencias o cuestiones planteadas por Stern, como, por ejemplo, la teoría del magnetismo para electrones libres en metales.

Estos trabajos de Pauli han sido considerados por algunos físicos como el germen de la física del estado sólido. Pauli y Stern convirtieron a la Universidad de Hamburgo en uno de los centros más significativos en el desarrollo y la fundamentación de la nueva teoría cuántica. Sin embargo, la relación entre ellos trascendió la propia disciplina de la física dando lugar al nacimiento de un efecto completamente inesperado: el denominado *efecto Pauli*.

Muchos años después, durante una entrevista que el filósofo de la ciencia Thomas S. Kuhn realizó a Stern, este declaró:

> Pauli no estaba autorizado a entrar en nuestro laboratorio debido al efecto Pauli. [...] Siempre íbamos a comer juntos, y él venía habitualmente a buscarme al laboratorio. Sin embargo, nunca entró. Simplemente llamaba a la puerta y esperaba a que yo saliese. En aquellos años éramos muy supersticiosos. [...] La cantidad de sucesos debidos al efecto Pauli ha sido enorme. Afortunadamente, en nuestro laboratorio siempre tuvimos la precaución de no permitir entrar a Pauli y por ello nunca sucedió nada irreparable.

EL EFECTO PAULI

En el libro escrito por el físico George Gamow *Thirty Years that Shook Physics*, el autor, refiriéndose a Pauli, dice lo siguiente: «Pauli es famoso en física por tres aspectos esenciales: i) el principio de exclusión, ii) la hipótesis del neutrino y iii) el efecto Pauli. Este último, al contrario de los dos precedentes, es un fenómeno misterioso que no es, ni probablemente lo será nunca, comprendido sobre una base puramente materialista». El efecto Pauli se puede enunciar en los siguientes términos: «Siempre que Pauli esté próximo a un equipo experimental, este se romperá o dejará de funcionar». Se han contado muchas historias sobre el efecto Pauli, efecto sobre el cual el propio Pauli se mostró muy orgulloso. El físico experimental de Gotinga, James Franck, comentó que en cierta ocasión, y sin causa aparente, un complicado aparato usado en su laboratorio para el estudio de los fenómenos atómicos dejó de funcionar. El efecto Pauli era ya un fenómeno ampliamente conocido y, por dicha razón, Franck envió una carta a Pauli, quien en aquellos momentos era profesor en Zúrich, comentándole lo que había sucedido. La sorpresa llegó con la respuesta de Pauli, ya que este informó a Franck de que en el momento justo en que se produjo el problema en su laboratorio, él se encontraba en la estación de tren de Gotinga, camino de Copenhague. Como comentó Gamow en el libro antes mencionado, «se puede creer o no la anécdota previa, pero existen muchas otras observaciones que han mostrado de modo inequívoco la realidad del efecto Pauli». Generalmente se acepta como un hecho bien establecido que ningún físico teórico puede manipular un equipo experimental; tan pronto como lo intenta, los aparatos dejan de funcionar. Por supuesto, ha habido alguna excepción a esta regla. En el caso de Pauli, su brillantez en física teórica fue tan grande que su influencia sobre los experimentos alcanzó cotas nunca antes vistas.

Como puede apreciarse (véase el recuadro sobre el efecto Pauli), Stern fue muy afortunado. No siempre el efecto Pauli pudo detenerse con una simple puerta cerrada.

A nivel más personal, el año 1927 trajo consigo algunos acontecimientos que tuvieron un terrible impacto en la vida de Pauli. Fue el inicio de una época en la que la vida de Pauli comenzó a deslizarse por una peligrosa senda. Durante 1927 tuvo lugar la separación de sus padres, separación debida en parte a la nueva relación de su padre con una joven de la misma edad que Pauli, con quien terminaría casándose en 1928. La relación de Pauli con su madrastra nunca fue fácil, y aunque Pauli intentó mostrar una discreción absoluta, la relación siempre resultó fría y distante. En 1956, dos años antes de su fallecimiento, Pauli se refería a la segunda esposa de su padre en los términos de «malvada madrastra». Sin embargo, el verdadero *shock* en la vida de Pauli se produjo en noviembre de 1927 con el suicidio de su madre.

A principios de 1928 Pauli fue nombrado catedrático en el famoso Instituto Politécnico Federal de Zúrich. Años después recordaba su viaje de Hamburgo a Zúrich: «Solo, en el tren rápido a Zúrich, en 1928 me dirigí por la misma ruta hacia mi nuevo puesto de profesor y hacia mi gran neurosis».

CAPÍTULO 4

El neutrino

Plantear la hipótesis de la existencia del neutrino, una partícula sin la más mínima evidencia experimental, fue todo un alarde de valor por parte de Pauli. La desesperación por explicar el denominado «proceso de decaimiento beta» y su absoluto rechazo a la interpretación de Bohr fueron los factores que le llevaron a postular una nueva partícula. Junto al principio de exclusión, este fue el segundo logro científico que le dio mayor reconocimiento y proyección a nivel social.

Los primeros años de Pauli como nuevo profesor en el Instituto Politécnico Federal de Zúrich coincidieron con desafortunados acontecimientos en su vida personal que le acabaron provocando una profunda crisis. Fueron años en los que Pauli tuvo problemas con la bebida y sufrió estados de profunda depresión, lo que le llevó a requerir la ayuda del eminente psiquiatra Carl Gustav Jung (1875-1961). Comenzó así una relación que se extendería durante muchos años. Pauli siempre mostró una gran discreción en este ámbito, y muy pocos físicos sabían de su relación con Jung. Los difíciles acontecimientos personales que vivió durante esta época no tuvieron, sin embargo, una influencia apreciable sobre su trabajo en física. Incluso en los momentos puntuales más complicados, Pauli siguió en contacto directo con sus colegas, compartiendo sus nuevas ideas científicas y criticando con su habitual estilo mordaz aquellas teorías que no le satisfacían.

La primera referencia sobre la hipótesis del neutrino se produjo prácticamente la misma semana en que se divorció de su primera esposa; aquel matrimonio duró menos de un año, pero dejó una profunda huella en la vida de Pauli, destruyendo en parte su confianza en sí mismo. La introducción del neutrino fue un acto de coraje y valentía. A pesar de sus dudas y de su propio carácter, poco dado a pasos revolucionarios, Pauli se atrevió finalmente a postular la existencia de una nueva partícula. Este fue el único

camino que halló para explicar el espectro energético en el proceso de desintegración beta (β) y el momento angular de algunos núcleos. La desintegración o decaimiento β es un proceso en el cual un núcleo emite radiación β (electrones o positrones), transformándose en otro núcleo diferente (más adelante se presenta una discusión en detalle). Muchos años después, Pauli se refirió al neutrino como «ese infantil e insensato resultado de la crisis de mi vida». Pauli creía que el neutrino no podría ser detectado, pero lo cierto es que su hipótesis ha sido uno de los postulados más fructíferos de la física moderna. Hubieron de transcurrir más de veinticinco años, sin embargo, para que el neutrino fuese detectado experimentalmente en 1956. Afortunadamente, Pauli vivió lo suficiente como para conocer dicho resultado al mismo tiempo que recibía otra noticia que le dejó completamente perplejo: la paridad (la propiedad de inversión espacial) no se conservaba en los procesos donde intervenían los neutrinos. Se había afirmado que el decaimiento beta era «un proceso donde no existía nada nuevo en relación a los principios de conservación». La violación de la paridad modificó drásticamente esta visión y supuso un verdadero *shock* para muchos físicos, especialmente para Pauli.

«He hecho algo terrible, he postulado la existencia de una nueva partícula que nunca podrá ser detectada.»

— Wolfgang Pauli.

NUEVO PROFESOR EN ZÚRICH

El 10 de enero de 1928 Pauli fue nombrado profesor en el Instituto Politécnico Federal de Zúrich (ETH, por sus siglas en alemán: Eidgenössische Technische Hochschule), puesto al que se incorporó en abril de ese mismo año. El ETH de Zúrich era uno de los centros europeos de mayor prestigio en física, donde habían trabajado investigadores de renombre. Además, mantenía una estrecha relación con la otra gran institución de la ciudad, la Universidad de Zúrich. Pauli fue el sucesor de Peter Debye, quien, a pesar de

los esfuerzos de las autoridades del ETH para que permaneciese en Zúrich, decidió finalmente trasladarse a Leipzig. Pauli tenía un gran reconocimiento como investigador científico y era una de las figuras punteras en física cuántica; sin embargo, sus dotes como docente no eran muy apreciadas por los estudiantes. Markus Fierz (1912-2006), uno de sus ayudantes, escribió años después:

> Pauli pertenecía a ese tipo de profesores que tienen el defecto de pensar sobre el tema del cual están hablando. De esta forma, sus palabras no van dirigidas a los oyentes o a los estudiantes, sino a sí mismo. La conferencia se convierte en una especie de soliloquio que raras veces resulta comprensible para la mayoría de los oyentes.

Pauli aceptó la oferta del instituto de Zúrich con la condición de que también nombrasen a un profesor asistente que le ayudase en sus tareas docentes e investigadoras. Esto se convirtió en una constante en la vida de Pauli, quien, a partir de entonces, siempre dispuso de un profesor ayudante con el que colaboraba estrechamente. Pauli, al contrario de algunos otros físicos de la época, tuvo pocos estudiantes que hiciesen el doctorado con él. Sus verdaderos *estudiantes* fueron sus ayudantes, muchos de los cuales obtuvieron un gran reconocimiento en los años siguientes, incluyendo el máximo galardón científico: el premio Nobel. El primer investigador a quien Pauli propuso como profesor ayudante fue Ralph Kronig, el joven que recibió todo el sarcasmo de Pauli tras sus primeras ideas sobre el espín. Esto muestra la falta de malicia de Pauli en las críticas, por duras que resultasen. Quizá fue también una forma en que Pauli quiso «reparar» el lamentable episodio con Kronig. En todo caso, Pauli consiguió que el ETH contratase a Kronig y este aceptó convertirse en el primer profesor asistente de Pauli. Es interesante reseñar la carta que Pauli envió a Kronig informándole sobre el puesto:

> Recientemente he recibido del Instituto Politécnico de Zúrich una oferta a partir del próximo semestre de verano. He conseguido como condición para aceptar el puesto que se proponga una beca para un profesor asistente. [...] Me gustaría preguntarle, de momento

> de modo bastante preliminar, si estaría interesado en principio en aceptar este puesto. Apenas tendría que realizar labores molestas; sus principales tareas serían: 1. Cada vez que yo diga algo debe contradecirme con argumentos detallados. 2. Debe animar y participar en las actividades científicas con ideas modernas, intentando atraer a estudiantes de doctorado y organizar coloquios y seminarios.

Pauli continuaba su carta a Kronig señalando las ventajas que su incorporación tendría para el instituto. En este sentido, mencionaba a los eminentes profesores que trabajaban en aquellos momentos en el ETH: el gran matemático Hermann Weyl (con amplios intereses en el estudio de la física cuántica) y el físico experimental Paul Scherrer (1890-1969). Además, al mismo tiempo que Debye abandonaba el instituto, Schrödinger dejaba la Universidad de Zúrich al ser nominado como sucesor de Planck en la Universidad de Berlín. Pauli mencionaba en su carta a Kronig su esperanza de que Gregor Wentzel fuese nombrado sucesor de Schrödinger (así sucedió algunos meses después) y concluía: «Si Wentzel, usted y yo (más Scherrer y Weyl) pudiésemos estar juntos en Zúrich, esto se convertiría en una aventura realmente interesante».

Pauli siempre dio una gran importancia a la labor de sus ayudantes y se esforzó para que tuviesen unas condiciones de trabajo dignas (es decir, unos estipendios razonables). Por supuesto, esto no excluyó en ningún momento los comentarios mordaces e incisivos que todos ellos recibieron en más de una ocasión. Kronig permaneció con Pauli durante el semestre de verano y años después recordaba su estancia en Zúrich como uno de los períodos más excitantes de su vida, y no solo en el aspecto científico. En una carta dirigida a Jordan escribió: «Ahora nos encontramos estudiando la vida nocturna en Zúrich y estamos intentando mejorarla haciendo uso de un nuevo método ideado por Pauli». Tras Kronig, el siguiente ayudante de Pauli fue Felix Bloch (premio Nobel en 1952). En los años sucesivos fueron sus ayudantes Rudolf Peierls, Hendrik Casimir, Victor Weisskopf, Markus Fierz y Res Jost, entre otros.

La colaboración entre Pauli, Kronig, Scherrer y Weyl en el Instituto Politécnico, junto a la incorporación de Wentzel en

la Universidad de Zúrich, convirtieron a esta ciudad en uno de los destinos más frecuentados por los físicos cuánticos de la época. Los coloquios conjuntos entre el ETH y la universidad fueron famosos en la época y, aunque Zúrich no tuvo una escuela de física al nivel de las que existían en Copenhague, Gotinga o Múnich, numerosos estudiantes y jóvenes doctores visitaron y realizaron estancias de diversa duración en la ciudad. Este fue el caso, entre otros, de Gregory Breit, Lev Landau, Max Delbrück, Robert Oppenheimer e Isaac Rabi, todos ellos grandes referentes de la física teórica y experimental.

Los primeros trabajos de investigación que Pauli desarrolló en su nuevo puesto en Zúrich se centraron en el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Los trabajos pioneros en este campo fueron desarrollados por Jordan y Dirac en los años previos, 1926-1927. Aunque Pauli ya había colaborado con Jordan sobre este argumento antes de su incorporación a Zúrich, fue a partir de 1928 cuando la interacción radiación-materia se convirtió en uno de los temas más recurrentes de su actividad científica. Estos trabajos de Pauli, realizados

EL CIRCO DE SCHERRER

A finales de la década de 1920, una actividad que adquirió gran popularidad, incluso a nivel social, fue la puesta en escena que Paul Scherrer y sus ayudantes preparaban sobre diversos experimentos. Estas conferencias o demostraciones tenían lugar en el gran auditorio del Instituto Politécnico de Zúrich y pronto se hicieron tan populares que era difícil encontrar una silla libre en el auditorio. Los estudiantes tenían que llegar varias horas antes para conseguir los mejores puestos, e incluso, muchos de los asistentes eran personas sin ninguna actividad ni relación con el campo de la física. Scherrer era famoso por su virtuosismo y su enorme precisión en la preparación de sus experimentos, aparte de su facilidad en explicar los mismos con una gran claridad y simplicidad. Los experimentos resultaban todo un espectáculo y la gente estaba entusiasmada con los mismos. Pauli también asistió a algunas de las presentaciones de Scherrer, pero no pudo reprimir sus mordaces comentarios cuando Scherrer se mostraba entusiasmado con alguna de sus *simples* explicaciones: «Sí, simples lo son de hecho, pero también erróneas».

en colaboración con Heisenberg, incorporan algunas de las ideas esenciales que permitieron el desarrollo de una de las teorías más fundamentales de la física en el siglo XX: la teoría cuántica de campos (véase el capítulo siguiente).

UN MATRIMONIO DESDICHADO

Pauli se casó con Kate Deppner en Berlín el 23 de diciembre de 1929. Desde el primer momento resultó un matrimonio extraño por la absoluta disparidad de caracteres e intereses de ambos. Además, Pauli se encontraba en una difícil situación personal, muy propensa a la depresión, agravada aún más por la complicada relación que mantenía con su padre tras su segundo matrimonio. Kate Deppner y Pauli se conocieron en Berlín, donde ella —al igual que Hertha, la hermana de Pauli— había estudiado interpretación con Max Reinhardt. Posteriormente, Kate Deppner fue contratada como bailarina en la escuela de danza de Trudi Schoop en Zúrich. En mayo de 1929, unos seis meses antes de su matrimonio, Pauli decidió abandonar la Iglesia católica. No está claro si dicha decisión fue motivada por su relación con Kate o bien por el profundo impacto que le había producido el suicidio de su madre. En todo caso, el matrimonio resultó un fracaso desde sus primeros momentos. No debía ser nada fácil convivir con Pauli. Además, parece que Kate Deppner conoció y comenzó a intimar con un joven químico polaco aun antes de contraer matrimonio con Pauli (de hecho, Kate se casó con él tras su separación). Todo ello convirtió la relación entre Pauli y Deppner en un período muy extraño que minó en gran medida la autoconfianza del físico. Muchos años después, en 1974, Kate Deppner se refería a su matrimonio en los siguientes términos:

> Cuando Pauli y yo nos casamos en Zúrich siempre me decía que él era alguien muy importante en el mundo de la física. Solía recibir cartas de muchos físicos, especialmente de Heisenberg. Siempre paseaba por nuestro apartamento como si fuese un león enjaulado,

expresando sus ideas y respuestas de la forma más cortante e ingeniosa. Esto le producía una gran satisfacción.

Pauli también fue consciente desde el primer momento de la extraña relación que mantenía con su esposa y así lo expresó en varias cartas dirigidas a algunos de sus colegas. Dos meses después de su matrimonio comentaba a Klein: «En el caso en que mi mujer se marche en algún momento, recibirás la noticia por escrito». Un mes después: «Mi mujer probablemente no me acompañará en mi viaje a Copenhague. Mi situación de casado es ciertamente extraña». Algunos de los físicos más cercanos a Pauli, especialmente sus colegas en Zúrich, eran partícipes de la difícil relación entre Pauli y Kate Deppner. Weyl escribió a un amigo de Hamburgo: «Con respecto al matrimonio, Pauli no está bien; de momento su mujer se encuentra viviendo de nuevo con su antiguo amigo en Berlín, pero seguramente volverá a reunirse con Pauli pronto».

Finalmente la situación se hizo insostenible, y el 26 de noviembre de 1930, once meses después de su matrimonio, se anunció el divorcio. Kate decidió abandonar a Pauli para casarse con el joven químico que había conocido tiempo atrás. Este hecho fue para Pauli un fracaso completo y, aunque intentó revestirlo con su típica ironía, lo cierto es que el abandono de Kate le sumió en una profunda depresión que le llevó a tener serios problemas con la bebida. Su profundo resentimiento estaba implícito, aunque algo oscurecido, en las palabras que usó para referirse a la nueva relación de su ex esposa: «Si al menos hubiese sido un torero, alguien con quien no pudiese competir, pero un simple y mediocre químico...». Claramente Pauli usaba sus mejores armas para intentar sobreponerse al sentimiento de abandono y fracaso que le acompañó durante unos años.

UNA IDEA GENIAL

En esta época de enorme agitación y desorden en su vida personal es cuando Pauli propuso otra de sus grandes aportaciones científicas: la hipótesis del neutrino. La primera referencia escrita

que existe sobre esta nueva idea se encuentra en una carta que Heisenberg dirigió a Pauli el 1 de diciembre de 1930, prácticamente la misma semana en que se anunció el divorcio entre Pauli y Kate Deppner. En la misma, Heisenberg escribió:

> En relación a tus neutrones me gustaría observar que deberían existir también núcleos con un número par de electrones, pero con la estadística errónea; tales sistemas aún no han sido observados. Probablemente, ello es debido a que el material experimental es aún insuficiente.

Esta carta de Heisenberg muestra claramente que Pauli ya había hecho partícipes a algunos de sus colegas de su nueva propuesta. El neutrón mencionado por Heisenberg se convertiría posteriormente en el neutrino. Téngase en cuenta que en la época en que Heisenberg escribió su carta y, por tanto, en la que Pauli presentó su hipótesis, Chadwick aún no había descubierto el neutrón. Otro aspecto esencial de la carta de Heisenberg es la relación que establece entre la nueva partícula de Pauli y la estadística de los núcleos. El 4 de diciembre de 1930 Pauli envió una carta abierta a un grupo de físicos participantes en un congreso científico sobre radiactividad celebrado en Tubinga. La misiva decía lo siguiente:

> En relación a la estadística de los núcleos de N y Li y del espectro continuo de la radiación beta, he llegado a un remedio desesperado [...] la posibilidad de que existan en el núcleo partículas neutras, que llamaré neutrones, que tienen espín 1/2, obedecen el principio de exclusión. [...] La masa de estos neutrones debe ser del mismo orden que la masa electrónica, y en ningún caso mayor que 0,01 veces la masa del protón. [...] En estos momentos aún no tengo la suficiente confianza como para publicar nada relacionado con estas ideas. [...] Admito que mi remedio puede parecer bastante incierto puesto que, de existir, los neutrones probablemente deberían haberse detectado ya. Pero quien «nada arriesga, nada gana».

La última frase de la cita previa resulta muy ilustrativa. Recoge la continua lucha que mantenía Pauli entre su «clasicismo» y su





FOTO SUPERIOR:
Pauli (a la izquierda) y Bohr se muestran absortos en las evoluciones de una peonza en esta fotografía realizada a mediados de la década de 1950 en Lund (Suecia).

FOTO INFERIOR:
Los asistentes a la Conferencia Solvay celebrada en 1930. Pauli está de pie y es el quinto comenzando por la derecha.

LA CRISIS PERSONAL Y LA RELACIÓN CON JUNG



Carl Gustav Jung.

Los años en los que Pauli introduce y elabora su teoría del neutrino son años de gran actividad científica en su vida. Es un período durante el cual Pauli alcanzó de nuevo máximas cotas de creatividad y realizó grandes logros científicos. Sin embargo, también es un período de enorme dificultad en su vida privada; son los años de su gran crisis personal. Pauli era plenamente consciente de estos problemas y así se lo comunicó a Kronig en 1931: «Tengo un gran temor a todo aquello relacionado con los sentimientos; por ello he intentado eliminarlos de mi vida. [...] [Esto] ha originado en mí una sensación de desorden, de pérdida de valores y otros fenómenos neuróticos. [...] Así pues, me he familiarizado con materias psíquicas que no conocía previamente [...] y que denomino de modo genérico *actividad propia del alma*». A comienzos de 1932, por sugerencia de su padre, Pauli se puso en contacto con el eminente psiquiatra Carl Gustav Jung. Entre ambos se estableció una estrecha relación —basada en gran medida en el material onírico que Pauli le proporcionaba— que se extendió durante más de veinte años. Jung hizo uso de algunos de los sueños de Pauli (con su consentimiento y de forma anónima) como parte de su trabajo de investigación. A lo largo de su extensa y continua discusión epistolar se evidencia el interés de Pauli por los aspectos psicológicos del ser humano. Muchos años después Pauli escribió: «Mi opinión personal es que la realidad en el futuro no será ni estrictamente psíquica ni física, sino que tendrá en cuenta de alguna forma ambos aspectos y a la vez ninguno de ellos». Muy pocos físicos fueron conocedores de esta nueva faceta en la personalidad de Pauli. A partir de 1934 la situación personal de Pauli mejoró notablemente tras su boda con Franca Bertram. Este nuevo matrimonio proporcionó a Pauli un estado de tranquilidad y sosiego con el que pudo superar «todos sus miedos y neurosis». El matrimonio perduró hasta la muerte de Pauli.

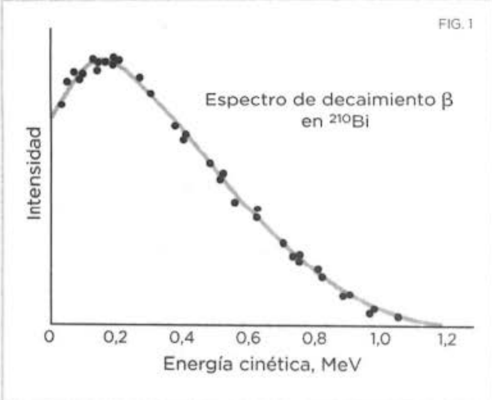
continuo afán por disponer de una teoría perfectamente construida y racionalizada, y sus brotes «revolucionarios», en los que conseguía dejarse llevar por su enorme intuición, aunque ello no

encontrase perfecto acomodo en su visión racional de la física. Obsérvese que eran dos los problemas esenciales a los que Pauli hacía referencia: la estadística de ciertos núcleos y el espectro de uno de los tipos de desintegración que se conocían, la radiación β.

Pauli intentó con su hipótesis resolver las dos cuestiones de forma simultánea, pero ¿qué razón condujo a Pauli a su nueva idea?, ¿por qué llegó a la conclusión de que era imprescindible introducir una nueva partícula? Todo ello sucedía en una época en la que solo se conocían dos partículas, el electrón y el protón (aparte de los fotones), y donde, además, la mayoría de los físicos eran partidarios de lo que se denominó el «sueño de los filósofos»: la existencia de una teoría física unitaria que pudiese construirse a partir de una sola partícula. Pauli fue muy consciente de todas estas consideraciones y supo desde el primer momento que tendría que vencer muchos reparos por parte de sus colegas. Era inevitable la confrontación con su mentor Niels Bohr, quien mantuvo durante años una visión radicalmente diferente a la suya. Por todas estas razones, la hipótesis de Pauli de postular la existencia de una nueva partícula sin la más mínima evidencia experimental, y cuya detección implicaba *a priori* dificultades insalvables, fue todo un acto de valentía y atrevimiento, y así fue reconocido por sus colegas. El físico Eugene Paul Wigner (1902-1995) señaló que su primera reacción al oír la hipótesis de Pauli fue considerarla «loca, pero valiente».

LA DESINTEGRACIÓN β Y LA ESTADÍSTICA NUCLEAR

El fenómeno de la radiactividad fue descubierto de forma accidental en 1896 por Henri Becquerel (1852-1908). El físico francés observó que determinados materiales eran capaces de emitir radiación (energía), y que dicho proceso no tenía nada que ver con el fenómeno de fosforescencia que se encontraba analizando. Además, concluyó que el fenómeno descubierto no dependía en absoluto del estado químico en que se encontrase la sustancia en particular. En las primeras décadas del siglo XX el fenómeno



de radiactividad fue estudiado en detalle por numerosos científicos: Pierre y Marie Curie, Ernest Rutherford, Frederick Soddy, etc. A través de su trabajo, aunque no pudo entenderse completamente el origen de dicho fenómeno (para ello fue necesario disponer de la nueva teoría cuántica y de una descripción del núcleo atómico), sí pudieron obtenerse las expresiones generales que permitían describir cómo se iban desintegrando los elementos radiactivos. También se observó que los procesos de desintegración radiactiva podían clasificarse en tres tipos: radiación α (emisión de núcleos de helio), β (emisión de electrones) y γ (interacción electromagnética, es decir, emisión de fotones). En 1914 el físico británico James Chadwick (1891-1974) mostró que el espectro energético de emisión de la radiación β era continuo. En otras palabras, los electrones emitidos en estos procesos podían adquirir cualquier energía comprendida entre un valor mínimo y uno máximo (figura 1). Este resultado fue completamente inesperado y condujo a una gran confusión. Si los estados nucleares iniciales y finales correspondían a valores determinados (discretos) de la energía, ¿cómo podían emitirse electrones con cualquier energía?

En la década de 1920 la discusión se centró en los posibles mecanismos que podían contribuir en el proceso de desintegración. Por una parte, Charles D. Ellis (1895-1980) y William A. Wooster (1903-1984) realizaron experimentos muy precisos, concluyendo que el espectro continuo observado en los resultados de Chadwick era debido a los electrones primarios, es decir, los electrones emitidos directamente en el proceso de desintegración radiactiva. Por el contrario, Lise Meitner (1878-1968), física nacida al igual que Pauli en Austria, estaba convencida del importante papel que jugaban los procesos secundarios en el espectro de Chadwick. No obstante, Meitner aceptó completamente la interpretación de Ellis y

Wooster tras repetir el experimento de los mismos, aún con mayor precisión.

La situación del problema con la radiación β fue claramente expuesta por el propio Pauli muchos años después, en 1957:

> El espectro continuo energético de rayos β, descubierto por Chadwick en 1914, trajo consigo de forma inmediata serias dificultades en su interpretación teórica. ¿Estaba dicho resultado relacionado directamente con los electrones primarios emitidos por el núcleo radiactivo, o con procesos secundarios? El primer punto de vista, que resultó ser el correcto, fue defendido por C.D. Ellis, mientras que el segundo era aceptado por L. Meitner.

La modificación en el punto de vista de Meitner queda claramente recogida en la carta que Pauli envió a Bohr en julio de 1929, con ocasión de una serie de conferencias que se impartieron en Zúrich:

> Fraulein Meitner ha impartido un seminario muy interesante sobre los aspectos experimentales de la desintegración β y casi me ha convencido de que no puede explicarse el espectro β continuo a través de procesos secundarios. Así pues, realmente no sabemos qué está sucediendo.

El segundo problema que Pauli intentó resolver con su hipótesis del neutrino fue el de la relación entre el espín nuclear, el momento magnético y la estadística de los núcleos. El ejemplo paradigmático fue el caso del nitrógeno. En la década de 1920 el modelo aceptado por la mayoría de los físicos era considerar los núcleos atómicos constituidos por protones y electrones. En 1926 Kronig señaló una primera dificultad relacionada con el valor del momento magnético de los electrones (el denominado magnetón de Bohr). Kronig indicó que, puesto que los electrones son constituyentes de los núcleos, estos últimos también deberían presentar un momento magnético que debería ser del orden del magnetón de Bohr, a no ser que los momentos magnéticos de todos los electrones en el núcleo tendiesen a cancelarse, un resultado en prin-

cipio muy improbable. Por otra parte, un núcleo con un momento magnético similar al momento del electrón conduciría a resultados completamente inconsistentes con el desdoblamiento de las líneas espectrales observado en la estructura hiperfina.

Una segunda dificultad apuntada de nuevo por Kronig dos años después de su comentario sobre el momento magnético, fue la *inconsistencia* entre el resultado experimental obtenido en 1928 en Utrecht sobre el valor del espín del núcleo de nitrógeno y la estructura del mismo. Las evidencias experimentales mostraron sin lugar a dudas que el momento angular del núcleo de nitrógeno era 1. Esto resultaba a todas luces inconsistente con una estructura de dicho núcleo constituido por 14 protones y 7 electrones. Tanto los protones como los electrones son partículas de espín semientero, y consiguientemente, un núcleo formado por un número total impar de partículas (electrones + protones) daría lugar a un espín nuclear resultante semientero, en contradicción con las evidencias experimentales. Esta conclusión se puso también en evidencia a través de trabajos posteriores —realizados por Walter Heitler (1904-1981) y Gerhard Herzberg (1904-1999)— en los que se concluyó que los núcleos de nitrógeno satisfacían la estadística de Bose-Einstein, un resultado consistente con el caso de partículas de espín entero, pero extraordinariamente sorprendente con la estructura aceptada en aquellos años para el núcleo de nitrógeno: 14 protones y 7 electrones. En un intento por comprender estos resultados, Kronig señaló que los protones y electrones en el interior de los núcleos probablemente perdían su identidad, es decir, no conservaban ni su espín ni su momento magnético tal y como se conocían cuando dichas partículas no formaban parte del núcleo. Era esta una visión que Pauli no aceptó en ningún momento.

PAULI VERSUS BOHR

En una conferencia que Pauli impartió en Zúrich en 1957, refiriéndose a la situación con la desintegración β a finales de 1920, dijo:

De acuerdo con estos resultados experimentales solo son posibles dos explicaciones teóricas del espectro continuo de radiación β:

1. La propiedad de conservación de la energía solo se satisface estadísticamente en aquellas interacciones responsables de la radiactividad β.
2. La ley de la energía es estrictamente válida para cada proceso primario individual, pero en dicho proceso otra radiación muy penetrante, consistente en nuevas partículas neutras, es emitida junto a los electrones. La primera opción fue defendida por Bohr, la segunda por mí.

Este comentario de Pauli muestra claramente las sendas, muy diferentes, adoptadas por ambos físicos para explicar el espectro continuo energético de la radiación β. Ello trajo consigo una profunda discusión que se extendió durante bastantes años, hasta mediados de la década de 1930, cuando Bohr finalmente aceptó las ideas de Pauli. Sorprendentemente, en aquel mismo momento Dirac entró en escena defendiendo la posibilidad de que la energía no se conservase estrictamente en los procesos individuales subatómicos. Una visión que supuso un cambio radical en las ideas previas que había defendido el propio Dirac.

Hoy puede resultar extraño que algunos de los más brillantes físicos del siglo XX pudiesen llegar a replantearse la ley de conservación de la energía, una ley que siempre se ha considerado fundamental en física. Sin embargo, la llegada de la teoría cuántica y la ingente cantidad de datos experimentales relacionados con procesos a nivel atómico hicieron que numerosos físicos se replanteasen muchas de las ideas establecidas de la física clásica. El nuevo marco conceptual proporcionado por la mecánica cuántica supuso un enorme cambio con respecto a la física clásica. Si no se podía hablar de trayectorias definidas de las partículas, si no se tenía posibilidad de conocer con precisión la posición y la velocidad de las mismas de forma simultánea, si la energía solo adoptaba valores discretos; en definitiva, si tantos conceptos y propiedades que se consideraban perfectamente establecidos y claros hubieron de ser replanteados, ¿por qué la ley de conservación de la energía a nivel microscópico iba a ser diferente?

Bohr no fue el primer físico en poner en duda dicha propiedad. En 1910 Einstein escribió: «En estos momentos tengo grandes esperanzas en poder resolver el problema de la radiación. [...] Quizá para ello deba renunciarse al principio de la energía en su forma presente». Solo tres días después de escribir el comentario previo, Einstein reconoció que la idea no funcionó y señaló expresamente que la opción de la no conservación de la energía resultaba claramente errónea. A pesar de la rectificación de Einstein, otros físicos mantuvieron la idea y la expresaron en distintas formas durante esos años: Walther Nernst, Charles G. Darwin, el mismo Sommerfeld, etc. Sin embargo, la propuesta más extrema sobre esta idea fue formulada en 1924 en un trabajo elaborado por Bohr, Kramers y Slater, quienes señalaron de modo muy explícito que la propiedad de conservación de la energía y el principio de causalidad solo resultaban válidos de forma estadística en transiciones cuánticas.

Pauli recibió el trabajo de sus colegas de Copenhague con gran recelo y escribió: «Uno no puede probar nada lógicamente y tampoco los datos disponibles son suficientes para decidir a favor o en contra de su tesis». Pauli se mostró muy cauto en aquel momento puesto que ningún experimento podía refutar, ni tampoco validar, las ideas expresadas por Bohr, Kramers y Slater. En 1925 la llegada de la nueva teoría cuántica y los nuevos experimentos de colisión realizados por Compton añadieron grandes dudas sobre la teoría de Bohr y sus colegas. Los resultados experimentales de Compton se explicaban perfectamente considerando que la energía se conservaba en procesos atómicos individuales. Sin embargo, a pesar de estos resultados, el debate continuó durante los años siguientes centrándose en el caso concreto del proceso de desintegración β.

Bohr mantuvo durante años, incluso después de los anteriormente citados experimentos de Ellis, Wooster y Meitner, su insistencia en que la energía solo se conservaba estadísticamente en el proceso de desintegración β. Ello fue, en gran medida, una respuesta a los serios problemas que existían en aquellos momentos en la descripción de la estructura nuclear. Para Bohr el posible abandono del principio de conservación de la energía era el precio a pagar por el tránsito de la física atómica a la física nuclear,

de igual modo que otros principios habían sido abandonados al pasar de la física clásica a la física del átomo. Aunque Pauli criticó duramente la visión de su mentor («[Bohr] se halla en una senda completamente equivocada»), Bohr persistió en su idea, que presentó por primera vez de forma pública en el seminario que impartió en Londres en el marco de las Conferencias Faraday. En el mismo, Bohr mostró su frustración por la mecánica cuántica, incapaz de explicar cómo cuatro protones y dos electrones se mantenían unidos para configurar una partícula α (recuérdese que la imagen aceptada del núcleo atómico era aquella en la que los únicos constituyentes eran los protones y electrones). Respecto al decaimiento β, su comentario final fue:

> En el estado actual de la teoría atómica no tenemos argumentos, ni empíricos ni teóricos, para mantener el principio de la energía en el caso de las desintegraciones β, e incluso su mantenimiento nos conduciría a complicaciones y dificultades adicionales.

Hubieron de transcurrir aún varios años, con algunos descubrimientos esenciales y nuevas explicaciones teóricas del decaimiento β, para que Bohr renunciase finalmente a sus ideas y aceptase la propuesta de Pauli.

EL POSTULADO DEL NEUTRINO

En su carta dirigida a los participantes en la reunión sobre radiactividad celebrada en Tubinga en diciembre de 1930, Pauli introdujo su nueva partícula neutra como un nuevo constituyente del núcleo atómico. Este se veía así conformado por tres partículas: el protón (el más pesado y con carga positiva), el electrón (ligero y con carga negativa) y el nuevo «neutrón» (también ligero y sin carga eléctrica). Todas ellas son partículas de espín 1/2 y, por tanto, satisfacen la estadística de Fermi-Dirac (esta estadística describe el comportamiento de sistemas de partículas idénticas de espín semientero). La hipótesis de Pauli pretendía resolver de forma si-

multánea las dos grandes dificultades que existían en aquellos momentos: explicar el espectro energético continuo en el proceso de desintegración β, y proporcionar una imagen del núcleo atómico consistente con sus valores del momento magnético, espín y estadística. Esta imagen de Pauli, sin embargo, introducía la siguiente cuestión: ¿qué fuerzas son responsables de mantener ligados en el seno nuclear los tres constituyentes? En concreto, ¿cómo se mantiene unida la nueva partícula neutra a los protones y electrones en el núcleo?

«Ahora lo que importa realmente es determinar qué fuerzas actúan sobre el neutrón de modo que este no pudiese mantenerse en el núcleo en el caso en que tales fuerzas no existiesen o fuesen demasiado débiles.»

— **Wolfgang Pauli, en una carta dirigida a Felix Klein en 1930.**

En una carta que Pauli escribió a Klein a finales de 1930 introdujo una ecuación explícita (similar a la ecuación de Dirac) para explicar el comportamiento de sus hipotéticos *neutrones* en presencia de un campo electromagnético. No obstante, mostró una gran cautela señalando que dicha ecuación podía conducir a *problemas* en determinadas circunstancias. El propio Pauli declaró: «Yo mismo dejaría de creer en los neutrones» si tales circunstancias fuesen posibles.

Poco tiempo después, Pauli abandonó la imagen de su nueva partícula como constituyente de los núcleos atómicos:

> Pronto abandoné la idea de que las partículas neutras emitidas en el decaimiento β fuesen al mismo tiempo constituyentes de los núcleos debido a los valores empíricos de las masas nucleares.

Durante los meses siguientes Pauli continuó elaborando su hipótesis, pero mostrando siempre una gran cautela en su validez. Este período coincidió con el inicio de una serie de viajes y estancias en diversos centros en los que pudo explicar directa-

mente sus ideas. En el verano de 1931 Pauli realizó su primera visita al continente americano. Allí impartió un seminario en el famoso Instituto de Tecnología de California (Caltech) invitado por Robert A. Millikan (1868-1953), el autor de la primera medida precisa sobre la carga eléctrica del electrón. El título del seminario fue: «Problemas en la estructura hiperfina», y constituyó la primera ocasión en la que Pauli presentó públicamente su teoría del *neutrón*. Él mismo lo recordó muchos después en una carta dirigida al físico Max Delbrück (1906-1981):

> Hablé públicamente por primera vez sobre mi idea de partículas neutras muy penetrantes en el decaimiento β. Sin embargo, ya no consideraba dichas partículas como constituyentes del núcleo, y por esa razón no las denominé neutrones; por el contrario, no usé ningún nombre especial para referirme a las mismas. Sin embargo, esta imagen aún me resultaba un tanto incierta, y decidí que mi charla no fuese impresa.

No obstante, la noticia se extendió rápidamente y al día siguiente apareció en *The New York Times* la siguiente crónica: «Un nuevo habitante en el corazón del átomo fue introducido hoy en el mundo de la física cuando el doctor W. Pauli, del Instituto de Tecnología de Zúrich, postuló la existencia de partículas o entidades que él ha bautizado con el nombre de neutrones». A pesar del intento de Pauli de no usar en su conferencia ningún nombre específico para sus nuevas partículas, el término *neutrón* se hizo público a nivel social.

Desde Pasadena, sede del Caltech, Pauli se trasladó a la Universidad de Michigan, en Ann Arbor, donde volvió a impartir una conferencia sobre su nueva partícula. Uhlenbeck señaló: «Me impresionaron mucho las ideas de Pauli, pero lo encontré todo muy extraño». La última actividad científica que Pauli realizó en Estados Unidos tuvo lugar en Princeton, donde coincidió con Dirac. Este habló de su reciente teoría sobre el monopolo magnético y hubo una discusión general sobre la ecuación de Dirac y, fundamentalmente, sobre algunas de las consecuencias más extrañas de la misma: la presencia de soluciones de energía negativa

EL NUEVO TESTAMENTO

El postulado del neutrino coincidió con otro de los trabajos más renombrados de Pauli: su *Handbuch Article*. Se trataba de un nuevo artículo enciclopédico titulado «Los principios generales de la mecánica ondulatoria», publicado en 1933. Pauli denominó a este trabajo su «nuevo testamento» para diferenciarlo del que había escrito algunos años antes sobre la vieja teoría cuántica y al cual dio el nombre de «viejo testamento». Aunque el nuevo trabajo de Pauli se convirtió desde el primer momento en un clásico y un referente esencial sobre la mecánica cuántica, la terminología que introdujo no fue adoptada prácticamente por ninguno de sus colegas. Tampoco fue apreciada por todos los físicos la noción de complementariedad, ampliamente discutida por Pauli en su trabajo. Él mismo lo reconoció muchos años después: «El punto de vista denominado complementariedad, que fue desarrollado por Bohr y otros, aunque compartido por la mayoría de físicos, aún sigue suscitando una considerable oposición». Pauli supo apreciar la importancia de su nuevo trabajo, aunque lo consideró «no tan bueno como mi artículo previo sobre la vieja teoría cuántica [...], pero en todo caso mejor que cualquier otra presentación que se haya hecho sobre la mecánica cuántica». Al igual que sucedió con sus dos artículos enciclopédicos previos, la teoría general de la relatividad y el viejo testamento, este nuevo trabajo contenía una recopilación completa de todo lo que se conocía en aquel momento sobre la mecánica cuántica. Pauli analizó desde los postulados básicos introducidos en los trabajos pioneros de Heisenberg, Born, Jordan y Schrödinger hasta las nuevas ecuaciones cuánticas relativistas, con mención especial a la de Dirac y todas sus *extrañas* consecuencias. Otras formas de la ecuación de ondas, como la de Weyl, que tendría una gran importancia años después en la descripción de los neutrinos, también fueron analizadas por Pauli. Por último, la lista de referencias comprendía básicamente la práctica totalidad de la literatura relacionada con cada uno de los problemas considerados en el trabajo. En especial, Pauli hizo frecuente mención al libro que Dirac publicó en 1930 con el título *Los principios de la mecánica cuántica*.

y su correspondencia con los posibles *antielectrones*. La teoría de Dirac se convirtió en una obsesión para Pauli, quien se negó a aceptar la interpretación de Dirac y llegó a desarrollar años después lo que él mismo denominó: «la teoría anti-Dirac».

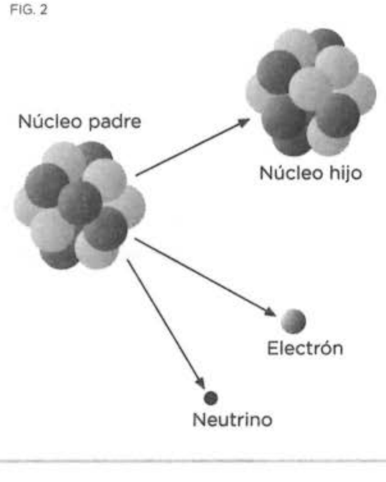
Finalizada su estancia americana, Pauli se dirigió directamente a Roma para participar, en octubre de 1931, en un congreso internacional sobre física nuclear. Sobre este acontecimiento, Pauli recordaba años después dos experiencias memorables:

«*Horribile dictu*, tuve que estrechar la mano a Mussolini» y «me encontré con Fermi, quien inmediatamente mostró un gran interés en mi idea con una actitud muy positiva respecto a mis partículas neutras». En 1932 Pauli aún se mostraba muy cauto con su imagen de las nuevas partículas. En una reseña al libro escrito por el físico George Gamow (1904-1968), Pauli escribió sobre los problemas que aún existían en física nuclear: «[problemas] que aún persisten desde un punto de vista teórico, tales como [...] el espectro continuo β».

El año 1932 se conoce como el *annus mirabilis* de la física nuclear. Ese año se descubrieron el neutrón, el deuterón y el positrón, y Heisenberg desarrolló la primera teoría cuántica del núcleo atómico. El primer gran logro científico del año tuvo lugar con el trabajo de Chadwick, quien, tras una intensísima actividad, pudo presentar públicamente al nuevo constituyente del núcleo: el neutrón. Esta partícula era, sin embargo, muy distinta a la que había introducido previamente Pauli. Aunque no presentaba carga eléctrica, su masa era muy similar a la del protón, es decir, mucho más pesada que la propuesta por Pauli. Por otra parte, el neutrón de Chadwick era claramente un constituyente básico del núcleo atómico. El descubrimiento del neutrón tuvo una importancia capital en la comprensión de la estructura nuclear. Al contrario del modelo previo, la nueva teoría consideraba como únicos constituyentes de los núcleos a los protones y neutrones. De este modo, tanto el espín como la estadística de los diversos núcleos atómicos podían describirse de modo satisfactorio. Al mismo tiempo, esta nueva imagen del núcleo implicaba que en el proceso de desintegración β tanto los electrones como las hipotéticas nuevas partículas de Pauli eran creadas en el mismo proceso de decaimiento, es decir, no existían previamente en el núcleo (figura 2).

Las nuevas partículas creadas en el proceso de desintegración β.

FIG. 2



La *realidad* del neutrón fue aceptada rápidamente y, por consiguiente,

NEUTRINOS, INTERACCIÓN DÉBIL Y VIOLACIÓN DE PARIDAD

La teoría de Fermi de la desintegración β seguía de cerca la incipiente teoría cuántica del electromagnetismo, y consideraba que el electrón y el neutrino se creaban durante el proceso de decaimiento β de modo similar a lo que sucedía en la emisión de fotones. Este proceso de creación y transformación de partículas tenía lugar en un punto del espacio-tiempo. Esto significaba que el mecanismo responsable de la desintegración era una fuerza de contacto, es decir, en un instante dado y en una posición definida se producía la transformación del neutrón en un protón y la consiguiente emisión del electrón y neutrino. Por otra parte, las evidencias experimentales requerían que la intensidad de la fuerza responsable del proceso fuese muy inferior a la electromagnética. Esto significaba que debía tratarse de una nueva interacción «fundamental» en la naturaleza que recibió el nombre de *interacción débil*. Puesto que la teoría cuántica relativista describía la interacción entre partículas a través del intercambio entre las mismas de partículas «portadoras» de la fuerza, el fotón para la interacción electromagnética, en el caso de la fuerza débil los «portadores» debían ser partículas cargadas muy pesadas (esto explicaría la transformación de neutrón en protón y el alcance básicamente nulo de la interacción). Surgieron así los denominados bosones vectoriales cargados: W^+ y W^-, que se detectaron experimentalmente en la década de

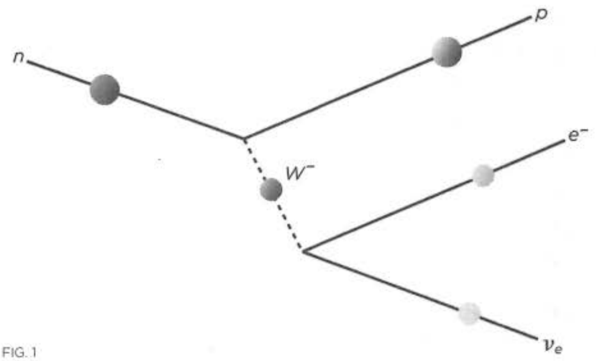


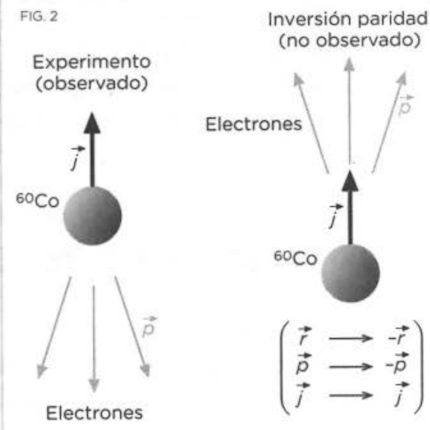
FIG. 1

hubo de buscarse una nueva terminología para referirse a la partícula de Pauli. El nombre finalmente adoptado se debe a Fermi, quien, haciendo uso del italiano, lo denominó *neutrino* («el pequeño neutrón»). Al contrario del neutrón, la discusión sobre la posible existencia de los neutrinos siguió persistiendo dando lugar a

1970. En la figura 1 se muestra esquemáticamente el proceso de decaimiento β con el intercambio de bosones *W*.

La transformación bajo paridad consiste en observar qué le sucede a un sistema cuando realizamos una inversión espacial, es decir, cuando cambiamos derecha por izquierda y a la inversa. Hasta mediados de la década de 1950 la mayoría de los físicos estaban convencidos de que todas las fuerzas de la naturaleza respetaban la conservación de la paridad, al igual que sucedía con la conservación de la energía, el momento, etc. Como se señala en el texto, la situación cambió radicalmente en 1956-1957 con la teoría de Lee y Yang y el posterior experimento de Wu y colaboradores. La no conservación de la paridad en la interacción débil está relacionada con una propiedad de los neutrinos. Estos, al igual que los electrones, son partículas de espín 1/2, lo cual significa que pueden presentar dos posibles estados de polarización. Por simplicidad, llamémoslos «helicidad» positiva y negativa. Sin embargo, en este aspecto existe una diferencia esencial entre los electrones y los neutrinos. Para los primeros, los dos posibles estados de polarización están permitidos y son igualmente probables. Por el contrario, los neutrinos solo existen en un estado determinado de polarización: helicidad negativa. Para los antineutrinos (las antipartículas del neutrino) sucede lo contrario: la polarización es positiva. Este hecho explica que la interacción débil (la única que sienten los neutrinos/antineutrinos) muestre diferencias entre derecha e izquierda. En la figura 2 se muestran los resultados del experimento de Wu y colaboradores. Los electrones se emiten en dirección opuesta a la del campo magnético (parte izquierda de la figura). Por el contrario, la situación de inversión de paridad (parte derecha de la figura) con los electrones emitidos en la dirección del campo magnético no se observa.

FIG. 2



acalorados debates entre los físicos de la época. Este hecho queda claramente reflejado en la original representación del *Fausto* de Goethe, que tuvo lugar en Copenhague ese mismo año, 1932.

Finalmente, después de haber transcurrido casi tres años desde su primera mención, Pauli decidió publicar su primer tra-

bajo sobre el neutrino haciendo uso de los *proceedings* correspondientes a la séptima edición de la Conferencia Solvay celebrada en Bruselas en octubre de 1933. En dicha reunión se presentaron también nuevas evidencias experimentales que mostraron de modo claro que la imagen de Bohr, con la no conservación de la energía, era errónea. Además, se propuso por primera vez la imagen de los neutrinos como partículas neutras con masa intrínseca nula (al igual que los fotones).

El postulado del neutrino de Pauli recibió un enorme espaldarazo en 1934 con la teoría de la desintegración β desarrollada por Enrico Fermi. En la misma, Fermi describe el decaimiento β como un proceso en el que se crean tanto el electrón como el neutrino en el estado final. Fermi considera un mecanismo similar al que permite explicar la emisión de radiación electromagnética (creación de fotones) por átomos excitados. La teoría de Fermi, basada en la formulación cuántica de campos que algunos años antes habían desarrollado Dirac, Jordan, Heisenberg y el mismo Pauli, fue un éxito rotundo. A partir de dicho momento, Bohr y algunos otros físicos abandonaron toda reticencia a la hipótesis del neutrino, y la teoría de Fermi constituyó durante más de veinte años la explicación más satisfactoria del proceso.

LOS NEUTRINOS DETECTADOS

La hipótesis del neutrino fue aceptada de modo general tras la teoría de Fermi de 1934. A partir de ese momento numerosos físicos trabajaron en el tema, refinando la teoría existente y proponiendo nuevas ideas. Sin embargo, nada realmente novedoso aconteció durante años, en los que tampoco se consiguió la más mínima evidencia experimental sobre la posible existencia de los neutrinos. Estos se habían convertido en las partículas más elusivas del universo; no sentían la interacción electromagnética (no tenían carga eléctrica ni momento magnético), ni la interacción fuerte que permitía explicar cómo se unían los protones y neutrones en el interior de los núcleos. Esto explica la extrema

dificultad en su detección experimental. No obstante, la situación con los neutrinos cambió radicalmente a mediados de la década de 1950. Por una parte, los físicos estadounidenses Clyde Cowan (1919-1974) y Frederick Reines (1918-1998) los detectaron por primera vez, sin ambigüedad, en 1956. Ambos físicos informaron personalmente a Pauli enviándole un telegrama en los siguientes términos: «Estamos felices de informarle que hemos detectado definitivamente neutrinos a partir de fragmentos de fisión en procesos inversos de decaimiento beta de protones». En realidad, los neutrinos no se detectaban directamente; su existencia se infería a partir de los productos resultantes de la reacción considerada. Por otra parte, ese mismo año los físicos Tsung-Dao Lee (n. 1926) y Chen-Ning Yang (n. 1922) publicaron un trabajo en el que concluían que la interacción débil, la única que sienten los neutrinos, no conservaba la paridad. Además, propusieron varios experimentos en los que se podría poner de manifiesto dicha hipótesis. Pauli estaba convencido de la «inviolabilidad» de las leyes de conservación: energía, momento, momento angular, paridad, etc., y, por consiguiente, su reacción no resultó nada extraña: «Estoy preparado para apostar que el experimento confirmará la invariancia de reflexión (conservación de la paridad), puesto que, a pesar de Lee y Yang, no creo que Dios muestre preferencias por la izquierda o derecha». El *shock* en Pauli fue inevitable. El experimento fue realizado al año siguiente por el equipo de la profesora Chien-Shiung Wu (1912-1997), confirmando completamente la propuesta de Lee y Yang (figura 3, página siguiente).

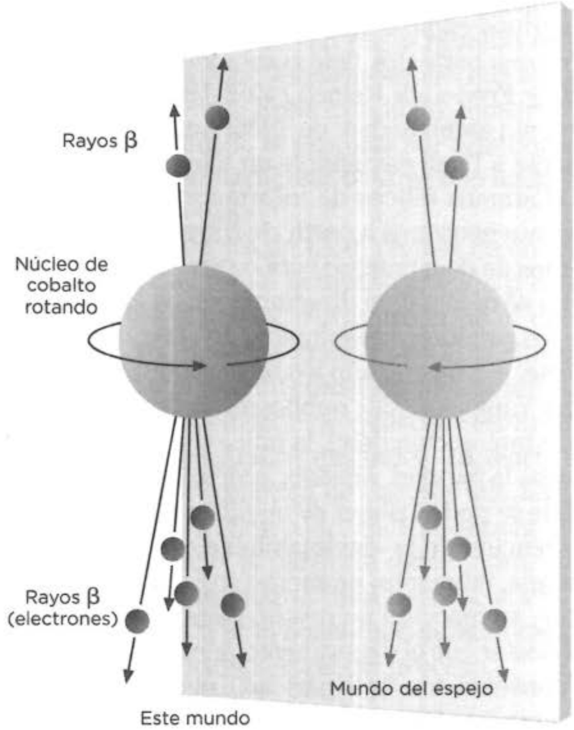
Pauli hubo de reponerse y algunas semanas después de conocer los resultados del experimento escribió con humor:

> Ahora que el primer *shock* ha pasado y comienzo a recuperarme [...] fue una buena idea que finalmente no hiciese una apuesta. Hubiese supuesto una gran pérdida de dinero (algo que no puedo permitirme). Me comporté como un idiota, [...] ahora todos mis colegas tienen todo el derecho a reírse de mí.

Con gran sentido del humor Pauli añadió una carta a su trabajo *Escritos sobre física y filosofía*, en los siguientes términos:

Ilustración que muestra la no conservación de la paridad en el proceso de decaimiento β en el núcleo de cobalto-60. La transformación de paridad implica la reflexión especular seguida de una inversión arriba-abajo. Obsérvese que el proceso final sería distinto al inicial.

FIG. 3



Es nuestro triste deber informar que nuestra querida amiga de muchos años, LA PARIDAD, falleció plácidamente el pasado 19 de enero de 1957 tras un breve período de sufrimiento causado por el tratamiento experimental. En nombre de los familiares de la difunta, e, μ, ν.

El estudio de los neutrinos y la interacción débil constituye en la actualidad uno de los campos de la física en los que existe una mayor actividad de investigación tanto a nivel experimental como teórico.

CAPÍTULO 5

La teoría cuántica de campos

Desde el mismo momento en que nació la teoría cuántica un aspecto esencial fue describir la interacción entre las partículas, así como la interacción entre estas y la radiación. Fueron muchos los físicos que analizaron este problema sin ser conscientes de que se convertiría con los años en uno de los mayores desafíos de la física. Surgió así la electrodinámica cuántica y, de forma más general, la teoría cuántica de campos. Pauli participó en esta aventura, que se convirtió en su mayor preocupación durante el resto de su vida.

Un átomo excitado realiza una transición a su estado fundamental emitiendo radiación electromagnética, es decir, fotones. Análogamente, un átomo absorbe un fotón pasando a un estado excitado. Sin embargo, ¿dónde se encontraba el fotón antes de que se produjese la transición?, ¿qué ha sucedido con el fotón tras su absorción por el átomo? En las dos situaciones la respuesta es la misma: el fotón simplemente ha sido creado o aniquilado en el mismo proceso de transición de un estado atómico a otro. La tesis es similar a la del proceso de decaimiento beta. Un núcleo se transforma en otro produciéndose la emisión de electrones y neutrinos. ¿Dónde se encontraban estas partículas? En ningún lugar, no existían previamente, han sido creadas en el mismo proceso de desintegración radiactiva.

La teoría relativista, con su principio de equivalencia masa-energía, nos permite entender, al menos de modo cualitativo, estos procesos en los que se crean y/o destruyen partículas. Así, la concepción del fotón como una partícula (el cuanto de luz) permitía en principio estudiar procesos de colisión entre partículas, incluyendo la radiación electromagnética, haciendo uso de las propiedades generales conocidas: conservación de la energía, momento y momento angular. El problema estaba claramente planteado y su análisis parecía muy prometedor. Solo había que encontrar la respuesta a la siguiente pregunta: ¿cómo surgen los

fotones?, ¿qué mecanismo es el responsable de que un átomo excitado produzca y emita un fotón?

En 1917 Einstein llevó a cabo el primer intento detallado de construir una teoría cuántica que le permitiese describir de forma unificada tanto los estados atómicos como la propia radiación electromagnética. Einstein estudió la condición de equilibrio térmico de un gas atómico en presencia de radiación electromagnética. Introdujo así sus famosos coeficientes de emisión (inducida y espontánea) y absorción. Einstein consiguió encontrar una sencilla relación entre los mismos, pero señaló:

> La determinación de los coeficientes requiere una mecánica y electrodinámica consistentes con la hipótesis cuántica. [...] Las propiedades de los procesos elementales hacen prácticamente inevitable la formulación de una verdadera teoría cuántica de la radiación.

Con la irrupción de la mecánica cuántica comienza la búsqueda sistemática de una teoría coherente que permita calcular los coeficientes de Einstein y, en definitiva, que proporcione una explicación de la interacción entre partículas y entre estas y la radiación.

PIONEROS DE LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

La primera referencia a una «electrodinámica matricial» apareció en el famoso trabajo realizado por Born, Jordan y Heisenberg. En concreto, esta parte de la investigación fue obra en gran medida de Pascual Jordan, el primer físico que analizó la cuestión de la cuantización del campo electromagnético introduciendo por primera vez el término de «segunda cuantización», un concepto que resultaría esencial en el posterior desarrollo de la teoría. Jordan y sus colegas consiguieron reproducir el resultado de Einstein para la relación entre los coeficientes de absorción y emisión a partir de los principios básicos de la nueva teoría cuántica, pero fueron

incapaces de calcular los propios coeficientes. Para ello resultaba imprescindible describir el mecanismo de creación y aniquilación de fotones, y esto significaba disponer de una teoría cuántica que tuviese en cuenta el acoplamiento entre la radiación y la materia. Este fue el camino emprendido por Paul Dirac.

Dirac es considerado el fundador de la electrodinámica cuántica. En dos trabajos realizados durante el período 1926-1927 desarrolló el formalismo necesario para la descripción de la interacción entre la radiación (campo electromagnético) y la materia dentro del marco general de la teoría cuántica. Los trabajos de Dirac tuvieron un enorme impacto e introdujeron las técnicas y conceptos esenciales para describir los procesos de creación y/o aniquilación de fotones.

Dirac no solo fue capaz de calcular los coeficientes de Einstein, sino que incluso pudo aplicar su teoría a problemas generales de dispersión en los que intervenían más de un fotón. Para ello, tuvo que extender su estudio inicial incorporando en el mismo la contribución de términos de orden superior (se denominan «correcciones radiativas»). Los dos trabajos de Dirac establecieron las bases fundacionales de lo que algunos años después se denominaría «electrodinámica cuántica», y marcaron la senda a seguir en el estudio de la interacción radiación-materia. A pesar de su éxito, la teoría de Dirac se encontró con dos dificultades que rápidamente atrajeron la atención de muchos físicos. La primera fue que la teoría de Dirac no era consistente con la teoría relativista, un *handicap* importante en un trabajo que intentaba describir el comportamiento cuántico del campo electromagnético. Dirac era plenamente consciente de esta limitación. El segundo problema estaba ligado a ciertos resultados absurdos *(infinitos)* que la teoría producía al considerar los términos de orden superior.

Los siguientes pasos decisivos en el estudio de la interacción radiación-materia fueron dados por Jordan. Este, en una serie de trabajos realizados en colaboración con diversos colegas, desarrolló la metodología general para cuantizar los campos clásicos extendiendo el lenguaje de segunda cuantización a todo tipo de partículas y campos, y no solo al caso electromagnético como

había considerado Dirac. Las visiones de Jordan y Dirac eran muy distintas. Mientras Dirac consideraba a las partículas elementales como las entidades fundamentales en la teoría cuántica, para Jordan tal propiedad correspondía al concepto de campo. Las partículas simplemente surgían a partir del proceso de «cuantización» del correspondiente campo clásico.

De esta forma, Jordan y sus colaboradores desarrollaron un lenguaje algo distinto al de Dirac, que aplicaron a todo tipo de partículas, tanto a los fotones de espín entero como a los electrones y protones de espín semientero. Jordan fue el primer físico en comprobar que el procedimiento de segunda cuantización podía conducir a la estadística de Fermi-Dirac (la que satisfacen las partículas de espín semientero). El formalismo desarrollado por Jordan constituye el punto de partida en la formulación de lo que años después se denominaría de modo general «teoría cuántica de campos».

PAULI ENTRA EN ESCENA

Pauli mostró un gran interés en los trabajos de Jordan y Dirac, lo cual no es óbice para que ambos físicos se librasen de sus mordaces comentarios. En los trabajos de Dirac la dependencia de los operadores de creación/destrucción con la variable temporal y las espaciales no era similar. Este aspecto estaba claramente en contradicción con los principios básicos de la teoría relativista. Así pues, Pauli consideró que el primer paso a desarrollar debía ser encontrar una formulación del procedimiento de cuantización que fuese consistente con los requerimientos de invariancia relativista. En otras palabras, la teoría debía ser invariante (no podía modificarse) frente a transformaciones de Lorentz: todos los sistemas inerciales son equivalentes y, por consiguiente, la formulación de la teoría no puede depender del sistema elegido para su estudio. Pauli analizó este problema en colaboración con Jordan considerando el caso particular del campo electromagnético libre. El trabajo fue enviado para su publicación el 7 de



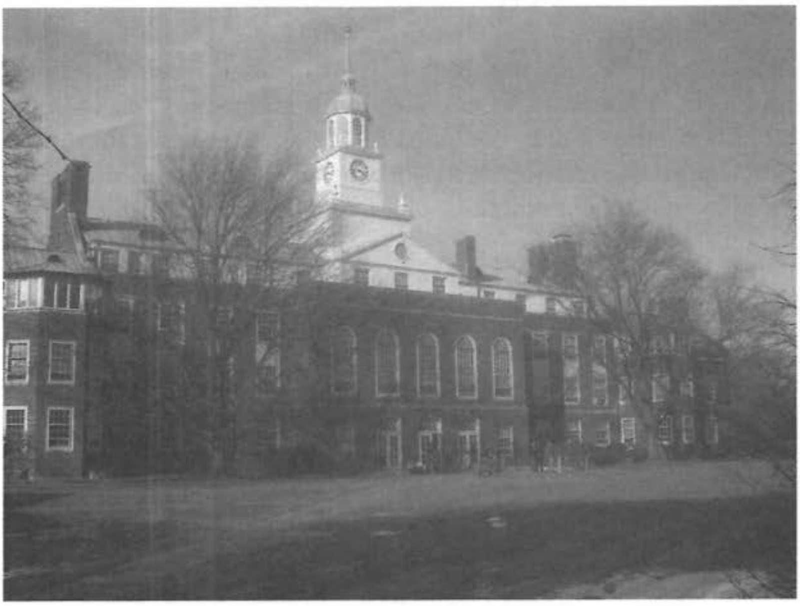


FOTO SUPERIOR:
Paul Dirac, Wolfgang Pauli y Rudolf Peierls fotografiados hacia 1953.

FOTO INFERIOR:
El Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, en Estados Unidos, donde Pauli dio clases mientras se prolongó la Segunda Guerra Mundial.

diciembre de 1927, siendo el último artículo científico que Pauli publicó antes de trasladarse a Zúrich.

A principios de 1928 Pauli propuso a Heisenberg el desarrollo de una formulación completamente relativista de la electrodinámica cuántica en presencia de interacción. La propuesta no podía ser más ambiciosa: establecer una teoría general de campos que aunase los aspectos cuánticos y relativistas de modo coherente proporcionando una descripción satisfactoria de todos los resultados hasta entonces conocidos. Todo ello se tradujo en casi dos años de continuo trabajo con períodos de gran frustración y desencanto. Surgieron dificultades y complicaciones inesperadas que estuvieron a punto de hacer fracasar todo el proyecto. Es importante mencionar que este fue el primer trabajo en el que la interacción radiación-materia fue analizada en el caso de los electrones con la recién descubierta ecuación de Dirac.

El trabajo de Pauli y Heisenberg dio lugar finalmente a dos extensas publicaciones que aparecieron a mediados de 1929 y principios de 1930, respectivamente. Aunque ambos trabajos fueron reconocidos por su profundidad, también estaban repletos de complicados cálculos matemáticos, por lo que resultaron muy difíciles de digerir para una gran mayoría de los físicos de la época. La teoría, a pesar de su completitud e incuestionable impacto científico, resultó muy complicada y tediosa. ¿Cuáles fueron las dificultades que estuvieron a punto de hacer fracasar el proyecto? Pauli lo admitió claramente y pidió consejo a Dirac:

> Me gustaría saber su opinión sobre una dificultad esencial que ha surgido en el esquema que Heisenberg y yo mismo estamos desarrollando, y que hasta el momento hemos sido incapaces de resolver. Nuestra teoría solo será completa y podrá compararse con el experimento si conseguimos establecer las leyes de conservación de la energía y el momento para todo el sistema físico (luz y ondas de materia).

La dificultad esencial a la cual Pauli se refería era que el valor para el tensor de energía-momento era infinito, un resultado clara-

mente absurdo. Pauli, en su carta a Dirac, continuaba su reflexión del siguiente modo:

> Por el momento no conozco ningún procedimiento para salir de esta situación. Mi impresión es que será necesario un profundo cambio en los fundamentos de nuestra teoría para evitar estas dificultades.

A pesar de los problemas señalados, Pauli y Heisenberg consiguieron completar sus trabajos. Para ello, hicieron uso de un procedimiento ideado por el propio Heisenberg («un truco matemático») que él mismo explicó en una carta dirigida a Jordan:

> El truco consiste en que no se empieza con la función de Lagrange correcta, [...] sino con una modificada, y solo se toma el límite de la expresión correcta al final, en los resultados.

El procedimiento de Heisenberg fue el primer ejemplo de lo que hoy día se conoce como *fijación del gauge* (el concepto «gauge» fue introducido por primera vez por Weyl en su infructuoso intento de encontrar una teoría de campos que unificase la interacción electromagnética y la gravitatoria), y consistía básicamente en añadir a la función lagrangiana que describía el sistema físico (ondas de materia + radiación electromagnética) un término proporcional a un pequeño parámetro ε, de modo que el tensor de energía-momento fuese finito. Solo se tomaba el límite $\varepsilon \rightarrow 0$ en los resultados finales. El «truco» de Heisenberg permitió que él y Pauli completasen su primer trabajo en marzo de 1929. Unos meses después, en septiembre, completaron el segundo trabajo sin hacer uso de ningún procedimiento relacionado con el parámetro ε.

El trabajo de Pauli y Heisenberg se erigió en la descripción más completa y coherente del proceso de interacción radiación-materia englobando en la misma todos los resultados que se habían obtenido en estudios previos. Además, la teoría era invariante relativista, una propiedad esencial para su consistencia. No obstante, Pauli y Heisenberg no consiguieron eliminar todos los

PAULI Y LA FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO

Pauli fue el primer físico que aplicó los principios básicos de la mecánica cuántica al estudio de los metales. En varios trabajos publicados durante el período 1926-1927, desarrolló una teoría del paramagnetismo haciendo uso de su principio de exclusión y de la estadística de Fermi-Dirac. Estos trabajos han sido considerados el germen de todas las teorías cuánticas posteriores que dieron lugar a una nueva rama de la física conocida como «física del estado sólido». A pesar de ello, la actitud posterior de Pauli respecto a este nuevo campo fue bastante ambigua. Pauli consideraba mucho más emocionante trabajar en la *física fundamental de la teoría cuántica de campos* que en problemas de estado sólido. En diversos escritos mostró su disgusto y rechazo, considerando a la física del estado sólido como una «física sucia»: «Uno no debería trabajar sobre semiconductores, eso es una obscenidad», «No me gusta esta física del estado sólido, [...] aunque yo fui quien la inició». No obstante, los comentarios previos pueden dar una imagen distorsionada de Pauli y su «falta de interés» en este nuevo campo. Rudolf Peierls, uno de sus ayudantes y un experto en la física del estado sólido, escribió: «[Pauli] ha expresado con frecuencia su desdén por la física del estado sólido, aunque él mismo ha contribuido de modo esencial a su nacimiento. Pero incluso en este campo hay problemas que le interesan». El mismo Pauli lo reconoció en la década de 1930: «Espero aprender [...] de Casimir sobre conductividad. Es un tema en el que de nuevo tengo un gran interés. He anunciado para el próximo semestre un curso sobre la teoría del estado sólido».

resultados infinitos. En particular, persistió dicha divergencia en el cálculo de la autoenergía del electrón (la energía adquirida por el electrón debido a la interacción con su propio campo electromagnético).

La metodología general seguida por Pauli y Heisenberg fue criticada duramente por Jordan y Dirac; sin embargo, la dificultad asociada a los resultados infinitos persistió y terminó convirtiéndose en una verdadera obsesión para muchos de los físicos de la época. Para algunos de ellos el sentimiento de frustración fue tan grande que decidieron abandonar completamente el tema o buscar planteamientos radicalmente diferentes. Pauli no fue ajeno a esta situación, pero siempre mantuvo un vivo interés en el desarrollo de la teoría cuántica de campos.

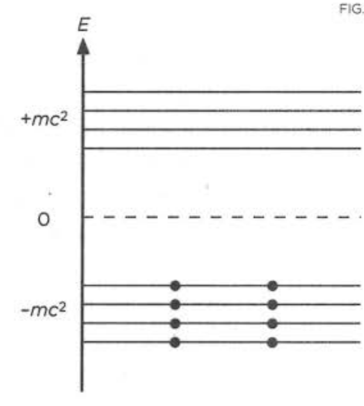
PAULI Y LA TEORÍA DE DIRAC

Dirac publicó su ecuación cuántica relativista del electrón a principios de 1928. La ecuación de Dirac fue considerada uno de los mayores logros científicos del momento. De la misma surgía el espín de forma natural y, además, describía perfectamente el momento magnético del electrón, la constante de estructura fina y la interacción entre el espín y el momento angular orbital del electrón en el átomo de hidrógeno. No obstante, la ecuación de Dirac fue también fuente de problemas inesperados. La estructura matemática de la ecuación traía consigo tanto soluciones correspondientes a valores positivos como negativos de la energía. ¿Qué significado físico podían tener estas últimas soluciones? Tras varios años de continuas discusiones y una gran frustración, Dirac decidió finalmente, con un gran atrevimiento por su parte, introducir su teoría de agujeros. En la misma, Dirac consideró que el estado de vacío correspondía a una situación en la que existía un continuo de estados ocupados por electrones con energías negativas.

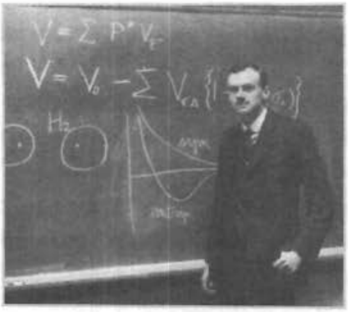
La teoría de Dirac proporcionó por primera vez una imagen correspondiente al estado del vacío cuántico. Dicha imagen, que se denomina «mar de Dirac» (figura 1), muestra el estado de vacío constituido por una infinidad de electrones ocupando estados de energía negativa. La imagen del mar de Dirac fue rápidamente cuestionada por muchos físicos que señalaron las «insalvables» dificultades que dicha teoría traía consigo: densidad negativa infinita de carga, energía asimismo infinita, etc. A pesar de ello, Dirac persistió en mantener su teoría y su siguiente paso fue interpretar la ausencia de uno de los electrones de energía negativa, es decir, la presencia de un hueco en el mar de Dirac, como un estado físico real correspondiente a una nueva partícula que debía ser similar al electrón en todas sus propiedades excepto en su carga eléctrica. Así pues, se trataría de

Espectro energético resultante de la teoría de Dirac. En el mismo se observa un continuo infinito de estados de energías negativas (menores que $-mc^2$) ocupados por electrones (el denominado «mar de Dirac») y un continuo de estados de energías positivas por encima de la energía propia del electrón, mc^2.

FIG. 1



DIRAC Y SU ECUACIÓN



Paul Dirac desarrolló un formalismo alternativo de la mecánica cuántica, denominado «álgebra cuántica», y publicó los trabajos seminales que dieron lugar al posterior desarrollo de la electrodinámica cuántica, la teoría que explica la interacción entre las partículas cargadas y entre estas y el campo electromagnético. Sin embargo, el descubrimiento científico que más fama le dio fue su formulación de la ecuación cuántica relativista del electrón y su hipótesis de la existencia del antielectrón. Dirac llevó su ecuación hasta sus últimas consecuencias, y de ello surgió la antimateria, uno de los conceptos de la física que más sensación ha causado entre la opinión pública. La formulación de la ecuación cuántica relativista es uno de los logros científicos donde se puso de manifiesto más claramente todo el genio creativo de Dirac. A partir de los principios fundamentales de las dos grandes teorías de la física en el siglo XX, la cuántica y la relatividad, Dirac obtuvo una ecuación cuyas soluciones escondían verdaderas sorpresas. La ecuación de Dirac resolvió numerosos problemas, pero también llevó a la física a sus límites. No es extraño que físicos de la talla de Heisenberg, Pauli y el mismo Dirac, entre otros muchos, llegasen a sentirse completamente perdidos en determinados momentos. Sin embargo, este profundo estado de confusión fue el revulsivo que la física necesitaba para que surgiese toda una nueva visión. Fue el comienzo de las nuevas teorías cuánticas de campo y partículas elementales, el paradigma de la física moderna.

un electrón positivo. De esta forma, Dirac introdujo el concepto de antielectrón, que extendió posteriormente a todo tipo de partículas. Surgió así el concepto de antimateria. Un año después de la hipótesis del antielectrón, el físico americano Carl Anderson (1905-1991) descubrió experimentalmente dicha partícula a la que dio el nombre de «positrón».

Pauli reconoció el gran logro científico de la ecuación de Dirac, pero nunca pudo aceptar la teoría de agujeros con la imagen del positrón como un hueco en el mar de Dirac. Incluso, tras el descubrimiento experimental del positrón, hecho que fue considerado por la mayoría de los físicos una clara vindicación

de la teoría de Dirac, el comentario de Pauli fue: «No creo en su percepción de los huecos aunque la existencia del antielectrón sea confirmada». Durante los años 1934-1935 la teoría de Dirac fue sometida al implacable juicio crítico de Pauli. Siempre que tuvo oportunidad mostró públicamente su oposición y su desdén por la imagen de Dirac, convirtiéndose en el más feroz crítico de dicha teoría. La opinión de Heisenberg no era mejor. En una carta dirigida a Pauli escribió: «Sabemos que todo es erróneo». La respuesta de Pauli: «No creo una sola sílaba, y cuánto más pienso en ella menos me satisface».

Durante el curso académico 1935-1936 Pauli impartió una serie de seminarios en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Refiriéndose a la teoría de Dirac, señaló: «Hasta el momento, el éxito parece haber estado más del lado de Dirac que del de la lógica». Durante estas charlas Pauli presentó también el trabajo que acababa de completar con su ayudante Victor Weisskopf (1908-2002) sobre partículas cargadas de espín cero. En el mismo, Pauli y Weisskopf hicieron uso de la ecuación de Klein-Gordon (la ecuación cuántica relativista asociada a partículas sin espín) y de todo el formalismo de campos cuánticos que Heisenberg y el propio Pauli habían desarrollado años antes. En un principio, Pauli consideró dicho estudio una simple curiosidad, al no existir en aquellos momentos ninguna evidencia experimental sobre la existencia de dicho tipo de partículas. No obstante, en referencia a la teoría de Dirac, escribió:

> La aplicación de nuestro viejo formalismo de cuantización de campos a la teoría escalar conduce sin ninguna hipótesis ulterior (sin la idea de agujeros, sin ninguna técnica de sustracción...) a la existencia de positrones y al proceso de creación de pares. [...] Tras la cuantización de los campos la energía es automáticamente positiva. Toda la teoría es invariante gauge y satisface también invariancia relativista. [...] De todo ello, lo que mayor placer me ha causado es poder decir algo desagradable sobre mi vieja enemiga, la teoría de Dirac.

Pauli denominó orgullosamente su trabajo como la «teoría anti-Dirac».

LOS AÑOS DE LA GUERRA. ESTANCIA EN PRINCETON

En 1938 Pauli se convirtió en ciudadano alemán tras la anexión de Austria por parte de Alemania. Este hecho significó un profundo cambio en la vida de Pauli y, con el comienzo de la guerra, su situación se hizo bastante peligrosa debido a sus antecedentes judíos. Tras sus fallidos intentos de conseguir la nacionalidad suiza, Pauli comenzó a explorar la posibilidad de salir de Zúrich y trasladarse a Estados Unidos. Finalmente, en mayo de 1940 el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton le ofreció un puesto de profesor invitado durante dos años (que se le prorrogó dos años más). Pauli y su esposa abandonaron Zúrich a finales de julio de 1940.

Pauli se adaptó rápidamente a su nuevo puesto y participó activamente en todas las conferencias y seminarios organizados por la Sociedad Americana de Física. Impartió charlas en las universidades de Chicago, Filadelfia, Ann Arbor (Detroit), MIT (Cambridge-Boston), Stanford y Berkeley, entre otras, y siguió manteniendo una gran actividad científica publicando artículos en temas diversos, aunque su principal línea de trabajo siguió siendo la teoría cuántica de campos. Pauli reconoció públicamente las excelentes condiciones de trabajo que tuvo en Estados Unidos. A finales de 1940 escribió: «En Princeton tengo más tiempo para trabajar de lo que he tenido nunca». En 1942 Pauli lamentaba la reducida actividad que existía en ciencia pura debido a los esfuerzos de la guerra, pero un año después él mismo consideraba la posibilidad de participar activamente en trabajos de investigación relacionados directamente con el desarrollo bélico. Robert Oppenheimer (1904-1967), en aquellos momentos director científico del proyecto Manhattan, le escribió una carta en los siguientes términos:

> Es difícil dar una respuesta clara a esta cuestión, [...] pero mi impresión es que en los momentos actuales sería una pérdida y un error para usted que hiciese tal cosa. Usted es quizá el único físico en el país que puede ayudar a mantener vivos aquellos principios de la ciencia que no parecen ser relevantes para la guerra.

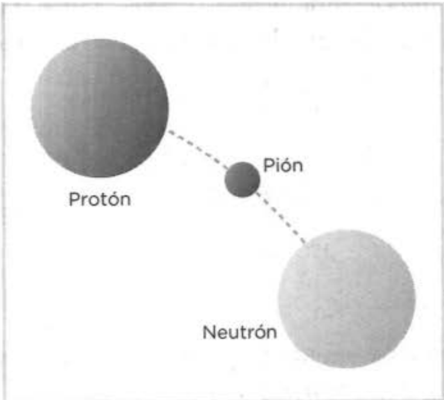
Desde el punto de vista científico, el período 1938-1945 contiene algunos de los artículos más relevantes de Pauli. En particular, su trabajo sobre la relación entre el espín y la estadística está considerado por muchos físicos como su artículo más brillante, aquel en el que Pauli desarrolló su teoría de una forma más rigurosa y completa. El artículo, titulado «La conexión entre espín y estadística», fue recibido en la revista americana *Physical Review* a mediados de agosto de 1940, justo cuando Pauli y su mujer estaban viajando a Estados Unidos. El origen de este trabajo se remonta a la teoría «anti-Dirac» que Pauli desarrolló con Weisskopf. Pauli reconoció que no era posible cuantizar la ecuación de ondas escalar haciendo uso del principio de exclusión, es decir, de acuerdo con la estadística de Fermi-Dirac. Pauli lo expresó claramente en 1934 en una carta dirigida a Heisenberg: «Un hecho importante es que nuestra teoría [la de Pauli y Weisskopf] solo puede desarrollarse a través de la estadística de Bose porque parece existir una íntima relación entre el espín y la estadística».

> «La conexión entre el espín y la estadística es una de las aplicaciones más importantes de la teoría especial de la relatividad.»
>
> — Wolfgang Pauli.

Durante los años siguientes Pauli estudió en detalle el caso de campos cuánticos asociados a valores arbitrarios del espín y concluyó que para espines enteros la regla de cuantización de acuerdo con el principio de exclusión no era posible. En 1940 formuló de modo riguroso su teorema: «Los campos correspondientes a espín semientero (entero) solo pueden ser cuantizados de forma consistente si satisfacen la estadística de Fermi-Dirac (Bose-Einstein)». Esta propiedad de consistencia estaba a su vez ligada íntimamente a propiedades básicas de la teoría cuántica de campos como su carácter invariante relativista y la ausencia de estados de energía negativa. Estos principios básicos de la teoría junto a las reglas de cuantización de los operadores de creación/aniquilación condujeron al resultado de Pauli. Un año después, en

FÍSICA DE MESONES

En 1935 el físico japonés Hideki Yukawa (1907-1981) propuso que, al igual que la interacción electromagnética entre partículas se debe al intercambio entre las mismas de un campo, el cuanto de luz (fotón), en el caso de las fuerzas nucleares que explican cómo se ligan los protones y neutrones en el interior de los núcleos debían existir también cuantos asociados a un nuevo campo mediador a los cuales se les denominó «mesones» (véase la figura). Yukawa señaló las propiedades generales que debían tener dichos mesones, pero se mostró muy cauto al no existir la más mínima evidencia experimental sobre su existencia. La primera reacción de Pauli fue de escepticismo. Se refirió a la nueva teoría como «Yukosis». Sin embargo, a principios de 1941 comenzó a interesarse más sobre el tema por sugerencia de Oppenheimer. Él mismo escribió: «Oppenheimer estimuló mi interés en este tema en 1941 y he escrito [durante la guerra] varios artículos sobre el mismo sin resolver definitivamente ningún problema». Pauli manifestaba claramente su frustración con los resultados obtenidos, pero, al mismo tiempo, su comentario es una clara señal del estado de confusión en el que se encontraba, tanto a nivel experimental como teórico, el estudio de las fuerzas nucleares. Hubieron de transcurrir muchos años para que se desarrollase una teoría general de la interacción fuerte: la cromodinámica cuántica, teoría que aún presenta importantes dificultades en su resolución.



1941, Pauli extendió su estudio y publicó en la revista *Reviews of Modern Physics* un trabajo general sobre teorías relativistas de campo en partículas elementales.

Pauli coincidió en Princeton con otros físicos y matemáticos europeos que también se habían visto obligados a emigrar: Hermann Weyl, John von Neumann, Eugene Paul Wigner, etc. Otros grandes científicos también allí presentes fueron Kurt Gödel, Carl Ludwig Siegel y, por supuesto, Einstein. De las discu-

siones entre Pauli y Einstein surgió una publicación conjunta en 1943, el único trabajo que Pauli publicó sobre la teoría general de la relatividad después de sus artículos de juventud.

EL PREMIO NOBEL. REGRESO A EUROPA

El 13 de enero de 1945 Albert Einstein envió un telegrama al comité de los premios Nobel en Estocolmo en los siguientes términos:

> Propongan a Wolfgang Pauli para el premio de Física. El denominado principio de Pauli o de exclusión se ha convertido en una parte fundamental de la teoría cuántica moderna, siendo independiente de cualquier otro axioma básico de dicha teoría.

Ese mismo año la Academia anunció la decisión de otorgar el máximo galardón científico a Pauli por el «descubrimiento del principio de exclusión». Desde 1933 numerosos físicos de gran renombre, muchos de ellos galardonados con el premio Nobel, habían propuesto a Pauli en repetidas ocasiones, pero parece que fue el telegrama tan explícito de Einstein el que consiguió finalmente convencer a los miembros del comité. Sorprendentemente, uno de los físicos más cercanos a Pauli, Niels Bohr, nunca le propuso.

> «Es difícil imaginar cómo hubiese sido la historia de la física sin la influencia de Pauli durante los últimos veinte años.»
>
> — Hermann Weyl.

Pauli decidió no asistir a la ceremonia que tuvo lugar en Estocolmo el 10 de diciembre de 1945 debido a sus dificultades para viajar fuera de Estados Unidos: Pauli no tenía la nacionalidad estadounidense y necesitaba un permiso especial para poder

salir y entrar de nuevo en el país. Por dicha razón, las autoridades académicas de Princeton organizaron un acto especial en homenaje al nuevo premio Nobel el mismo día que tuvo lugar la ceremonia en Estocolmo. Al acto asistieron autoridades académicas de diversas universidades y una representación de la embajada sueca en Washington. Un gran número de físicos y matemáticos de renombre universal estuvieron también presentes en el homenaje. Tras la presentación oficial del director del Instituto de Estudios Avanzados, Hermann Weyl fue el encargado de pronunciar el *encomium:* «Pauli ha sido la conciencia y el criterio de verdad para una gran parte de la comunidad de físicos teóricos».

Tras el discurso de Weyl, Einstein se puso en pie y, de modo inesperado, pronunció unas palabras. En 1955, tras el fallecimiento de Einstein, Pauli escribió:

> Nunca olvidaré el discurso que pronunció en mi honor en Princeton en 1945 después de que me hubiese sido concedido el premio Nobel. Fue como un rey que abdica y me nombra como una especie de hijo adoptivo, como su sucesor. Desgraciadamente, no existe ningún registro oficial del discurso de Einstein; fue algo totalmente improvisado y no existe ningún documento ni manuscrito.

Un año después, el 13 de diciembre de 1946, Pauli asistió en Estocolmo a la ceremonia de premios Nobel y pronunció su conferencia sobre el principio de exclusión.

Después de ser galardonado con el premio Nobel, Pauli recibió ofertas de trabajo de algunas de las mejores universidades americanas, incluyendo el propio Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. También mostraron interés universidades europeas y el propio Instituto Politécnico de Zúrich (ETH), en el cual Pauli mantenía todavía su puesto como catedrático de Física Teórica. En enero de 1946 Pauli obtuvo la nacionalidad estadounidense y al mes siguiente emprendió, junto a su esposa, un viaje por Europa. A primeros de abril llegaron a Zúrich y un mes después el presidente del ETH anunció el programa oficial

de cursos de la institución, entre los cuales figuraban dos que impartiría el profesor Wolfgang Pauli. Durante los meses siguientes las discusiones entre Pauli y el presidente del ETH continuaron con un claro deseo por ambas partes de que finalmente Pauli pudiese reincorporarse a su antiguo puesto y además, consiguiese en un tiempo breve la nacionalidad suiza. El presidente del ETH mencionó: «Me sorprendió el cambio que observé en el carácter de Pauli. Antes siempre se mostró arrogante, mientras que ahora es particularmente modesto y afable». En agosto de 1946 Pauli escribía a Rabi informándole de su decisión final de permanecer en Zúrich. Tres años más tarde, en 1949, Pauli consiguió la ciudadanía suiza.

CAPÍTULO 6

La conciencia de la física

Durante su segundo período en Zúrich Pauli siguió manteniendo una gran actividad científica, centrándose especialmente en el ámbito que siempre atrajo más su atención: la teoría cuántica de campos. Aunque la antorcha de la creatividad había pasado a manos de una nueva generación de físicos, la reputación de Pauli como «conciencia» de la física siguió consolidándose. Fue una época en la que Pauli dejó también su impronta personal en otras ramas del conocimiento, como la filosofía y la psicología.

La reincorporación de Pauli al Instituto Politécnico de Zúrich marcó el comienzo de una nueva fase en su vida. Una fase en la que Pauli siguió atentamente la evolución de la teoría cuántica, pero sabiendo que se había convertido, al igual que la mayoría de los físicos de su generación, en un actor secundario. Ello no le impidió seguir participando puntualmente en el desarrollo de la teoría y, sobre todo, seguir sometiendo a su implacable crítica todos aquellos trabajos que llamaban su atención.

Sin embargo, el mundo de Pauli no se reducía a la física. También estuvo siempre interesado por otras ramas del conocimiento, como la filosofía y la psicología. Fue en la última etapa de su vida cuando Pauli venció todos sus recelos y decidió escribir y publicar sus ideas. Por otra parte, también se atrevió a hacer pública su duradera relación con el psiquiatra Carl Gustav Jung, reflejada en la extensa correspondencia epistolar entre ambos. No debió ser una decisión fácil. En el mundo de la física ha sido en ocasiones habitual menospreciar y desdeñar las incursiones «filosóficas». Algunos de los colegas de Pauli nunca quisieron hacer ninguna mención explícita a esta nueva faceta de su personalidad. Siempre consideraron que no había tenido ninguna influencia en sus descubrimientos y logros científicos. Sin embargo, como señaló Abraham Pais, no hablar de esta faceta de Pauli sería dejar su historia incompleta.

Pauli nunca ha sido un personaje conocido fuera de los estrechos límites del mundo de la física. No es extraño. Muy pocos físicos a lo largo de la historia se han convertido en personajes públicos. Pauli nunca rehuyó la confrontación dialéctica con sus colegas, nunca acalló su espíritu crítico, pero siempre se mantuvo dentro de unos límites muy estrictos. Nunca fue el abanderado de ninguna actividad social que le diese renombre y popularidad. Su imagen siempre fue la de un científico entregado en cuerpo y alma a su trabajo. Para él la ciencia solo podía progresar a través del libre intercambio de ideas, y este fue el camino que siempre siguió. Nunca mostró el más mínimo reparo en compartir sus ideas con sus colegas; una muestra inequívoca de su gran integridad y honestidad científica.

SEGUNDO PERÍODO EN ZÚRICH

A partir de 1946 Pauli permaneció ligado al Instituto Politécnico de Zúrich, relación que ya mantuvo el resto de su vida. Durante todo este período Pauli volvió a impartir cursos sobre temas diversos y siguió participando activamente en trabajos de investigación relacionados con la teoría cuántica de campos. Los estudiantes, como ya había sucedido en los años anteriores a la guerra, siguieron quejándose de la dificultad en seguir sus seminarios. A pesar de ello, el número de estudiantes graduados y de jóvenes doctores que realizaron estancias en el ETH aumentó apreciablemente. Jóvenes de diversos países europeos y de Estados Unidos se sintieron atraídos por su personalidad y quisieron aprender directamente de él. Era mayor el deseo de trabajar con Pauli que el temor a sus críticas y comentarios. No obstante, con los años su carácter se fue suavizando.

Durante su segundo período en Zúrich Pauli viajó por todo el mundo, asistiendo a congresos e impartiendo conferencias, y tres años después de su regreso, en 1949, volvió a trasladarse al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton durante un semestre. Cuando le preguntaron por sus planes en Princeton contestó: «He regresado a Estados Unidos para descubrir qué está sucediendo en la física, y para perder peso». Pauli reconocía clara-

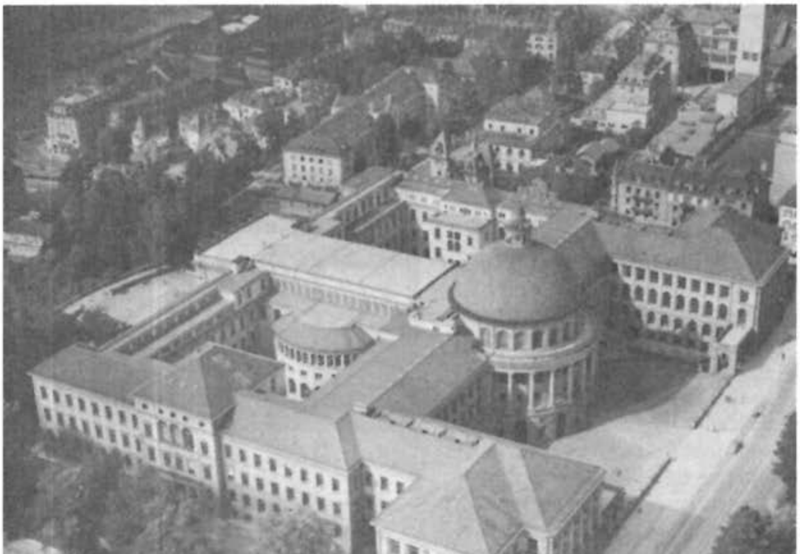




FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Pauli fotografiado hacia 1945, al final de la Segunda Guerra Mundial.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Pauli hacia 1940 junto a Arnold Sommerfeld, quien había sido su gran maestro y por el que siempre mostró un gran respeto.

FOTO INFERIOR:
Vista del Instituto Politécnico de Zúrich en 1955, al que Pauli regresó en la última etapa de su vida.



mente que el papel prominente en la física moderna se había desplazado al continente americano. La nueva situación reflejaba la enorme fuga de físicos de primer orden que se produjo en Europa durante el nazismo y la guerra. Muy pocos físicos optaron por el camino de vuelta emprendido por Pauli y la mayoría de ellos decidieron permanecer en Estados Unidos el resto de sus vidas.

Desde el punto de vista científico, y tal como ya se ha apuntado, el máximo interés de Pauli durante el período 1946-1958 siguió centrado en la teoría cuántica de campos. En 1949, durante su visita a Princeton, Pauli estaba plenamente al corriente de los progresos realizados en la electrodinámica cuántica. Sin embargo, no tuvo ninguna participación activa en el desarrollo de la nueva teoría. Su única publicación científica sobre el tema fue el trabajo

LA «NUEVA» ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA: QED



Shin'ichiro Tomonaga en 1953.

A raíz de la famosa conferencia que se organizó en la isla de Shelter, celebrada en 1947, comenzó a surgir una nueva formulación de la teoría cuántica de la interacción radiación-materia. Es lo que se conoce como «programa de renormalización», un procedimiento que hizo posible obtener resultados físicos no ambiguos sustrayendo y eliminando los famosos infinitos asociados a los cálculos de orden superior. Este programa, desarrollado de modo independiente por Julian Schwinger (1918-1994), Richard Feynman (1918-1988) y Shin'ichiro Tomonaga (1906-1979), dio lugar a la «nueva» electrodinámica cuántica, la teoría que hoy día se conoce simplemente por su acrónimo en inglés: QED (*Quantum ElectroDynamics*), y que se ha convertido en la teoría física más precisa que existe. El acuerdo entre las predicciones de la QED y las evidencias experimentales es en algunos casos asombroso: del orden de una parte en 10^{12}. Esta es la situación con el momento magnético del electrón o con el famoso efecto «Lamb» asociado al desdoblamiento de dos niveles energéticos determinados en el átomo de hidrógeno.

que realizó en colaboración con Felix Villars (1921-2002), en el cual ambos físicos desarrollaron una técnica matemática específica basada en el procedimiento de regularización, aplicándola al caso del momento magnético del electrón. Se conoce hoy día como «regularización de Pauli-Villars». Aparte de este trabajo, la contribución de Pauli se limitó a la discusión y crítica de los trabajos realizados por sus jóvenes colegas. Mantuvo una relación especial con Julian Schwinger a quien se refería con el título de «Su Majestad», quizá en reconocimiento a su impresionante trabajo en la formulación de la nueva electrodinámica cuántica, o a su especial carácter y el trato condescendiente que, en su opinión, parecía dispensar a los demás.

«Wigner me dijo que ya no era tan educado como solía ser antes. Yo le repliqué que a mí me sucedía justamente lo contrario.»

— Wolfgang Pauli.

Más importante que sus propias contribuciones científicas fue el hecho de que Pauli se convirtiese en un imán para muchos investigadores que decidieron trabajar bajo su «protección». Surgió de esta forma en Suiza uno de los grupos más dinámicos en el estudio de la electrodinámica cuántica, cuyos miembros más representativos fueron Res Jost (1918-1990), Ernst C.G. Stueckelberg (1905-1984) y Joaquin M. Luttinger (1923-1997).

Otro tema que atrajo la atención de Pauli a mediados de 1950 fue el de la posible formulación de teorías de campo que pudiesen ser aplicables a todas las interacciones y que fuesen «renormalizables» (es decir, que permitiesen el cálculo de observables). A finales de 1953 el joven físico chino Chen-Ning Yang impartió un seminario en Princeton (que contó también con la presencia de Pauli) sobre el trabajo que acababa de completar en colaboración con su estudiante Robert Mills (1927-1999). El propio Yang señaló:

Tan pronto como mostré las ecuaciones del campo, Pauli preguntó: ¿Cuál es la masa de este campo?, a lo que yo contesté que no lo

> sabíamos. Intenté continuar impartiendo el seminario, pero Pauli volvió a repetir la misma pregunta. Le dije que era un problema muy complicado sobre el que habíamos trabajado duramente, pero sin llegar a ninguna conclusión definitiva. Aún puedo recordar su réplica: «Eso no es suficiente excusa». El comentario me cogió tan de sorpresa que decidí sentarme y dar por concluida la charla. La situación resultó bastante embarazosa. Finalmente, Oppenheimer me pidió que continuase con el seminario, y Pauli no volvió a realizar ninguna pregunta. Al día siguiente encontré una nota de Pauli en los siguientes términos: «Estimado Yang: Lamento que no haya querido hablar conmigo después de su seminario. Con mis mejores deseos».

Pauli era plenamente consciente de las dificultades de la teoría. Unos meses antes del seminario de Yang escribió: «Si uno intenta formular ecuaciones de campo [...] siempre obtendrá mesones vectoriales con masa nula en reposo». Estos resultados eran incomprensibles para Pauli. Su imperiosa necesidad de claridad conceptual le impidió publicar nada sobre estos estudios. Si hubiese tenido el atrevimiento necesario para hacerlo, su trabajo se habría convertido indudablemente en su contribución científica más importante tras la guerra. Aunque recibida al principio con gran escepticismo, veinte años más tarde la teoría de Yang-Mills se convirtió en piedra angular en la descripción de las interacciones débiles y fuertes.

FILOSOFÍA Y PSICOLOGÍA

Pauli siempre mostró un gran interés en la filosofía. En sus años juveniles mantuvo contacto epistolar con varios filósofos y apreció enormemente, aunque no compartió, las ideas de su gran mentor en sus primeros años: Ernst Mach. Con el tiempo llegó a estudiar en profundidad griego clásico para poder leer en su lengua original a los filósofos clásicos, especialmente Platón. Pauli también participó muy activamente en las continuas discusiones que surgieron a partir de 1926 sobre la fundamentación de la mecánica

cuántica. Durante este período escribió artículos sobre el espacio, el tiempo y la causalidad, la materia, la evolución histórica de las nociones de espacio y tiempo, la relatividad, la probabilidad en física, etc. Muchos de sus escritos fueron recopilados en el libro *Escritos sobre física y filosofía*, publicado en 1994.

«Debo decir que no me identifico con ninguna corriente filosófica particular cuyo nombre termine en "ismo". Mi propio pensamiento filosófico es una combinación de Schopenhauer, Lao-Tsé y Niels Bohr.»

— Wolfgang Pauli.

Pauli manifestó que su «gran transformación espiritual en sus años posteriores» fue el resultado de su reflexión sobre el principio de complementariedad de Bohr y, sobre todo, de su relación con Carl Gustav Jung y sus discusiones sobre la influencia de los aspectos psicológicos en el desarrollo y la evolución de las ciencias naturales. La relación entre Pauli y Jung, que se extendió durante más de veinte años, marcó la vida de ambos personajes. Jung se convirtió en la persona fuera del ámbito de la física que ejerció una mayor influencia sobre la vida de Pauli. También Jung y su trabajo se vieron «recompensados» por la fuerte personalidad de Pauli: «Gracias al interés que el profesor Pauli ha mostrado por mis investigaciones —declaró Jung— me he encontrado en la ventajosa posición de poder discutir con un brillante físico que siempre ha mostrado aprecio por mis argumentos sobre psicología».

La extensa relación epistolar entre Pauli y Jung tuvo como origen la descripción de numerosos sueños por parte de Pauli, los cuales sirvieron a Jung como valiosísimo material de trabajo para el desarrollo de su teoría sobre la conexión entre los fenómenos físicos y psicológicos. Pauli siempre apreció las tesis de Jung, afirmando que «su idea del inconsciente colectivo y la interpretación del mandala eran esencialmente correctas» (el término «mandala» procede del sánscrito y puede traducirse como «círculo mágico»). Sin embargo, Pauli también criticó con su ha-

UNA VISIÓN SOBRE KEPLER


Johannes Kepler.

En la última década de su vida Pauli elaboró sus ideas esenciales sobre psicología considerando que la relación entre el conocimiento consciente e inconsciente debían ser complementarios en el sentido que introdujo Bohr con su principio. Bajo esta suposición, Pauli consideró el siglo XVII como el período a partir del cual comenzó a producirse la separación entre el «racionalismo» y el «misticismo religioso». Este profundo interés de Pauli por el contraste entre racionalismo y misticismo le llevó a escribir un estudio detallado sobre la figura de Johannes Kepler (1571-1630) y su obra. Kepler representaba para Pauli el último ejemplo de unión entre los dos modos de pensamiento. Por una parte, las leyes de Kepler marcan el comienzo de la astronomía moderna; por otra, Kepler siempre estuvo convencido de que la profunda armonía en los cielos era una consecuencia del «alma» que animaba tanto al Sol como a la Tierra (*anima terrae*). Pauli publicó su estudio sobre Kepler en un extenso artículo en el que también mostró su fascinación por el significado místico y simbólico de los números 3 y 4. Su preocupación por el tema queda reflejada en el siguiente comentario que realizó en 1951: «Mi camino hacia el principio de exclusión tuvo que ver con la difícil transición entre el 3 y el 4, con la necesidad de asignar al electrón un nuevo cuarto grado de libertad [el espín], además de los tres que ya existían para las traslaciones». El trabajo de Kepler reveló aspectos de la personalidad de Pauli desconocidos para la mayoría de sus colegas físicos, así como una gran erudición en el conocimiento de la filosofía clásica griega.

bitual estilo mordaz algunas de las ideas de Jung. Así, continuó escribiendo:

> Mis consideraciones sobre la tesis del inconsciente colectivo no son debidas, por supuesto, a que el gran Jung la haya desarrollado (después de todo, siempre he sido muy crítico con el argumento de

la autoridad). Acepto la tesis de Jung porque la idea en sí misma me parece plausible. [...] No puede rechazarse sin más, a pesar de que observo una completa falta de creatividad y talento entre algunos de los colaboradores más cercanos de Jung. Siendo más preciso, estoy en total desacuerdo con muchas de sus tesis. [...] No quiero tener nada que ver con horóscopos [...] ni con su teología.

ÚLTIMOS AÑOS

Los últimos años en la vida de Pauli coincidieron con la confirmación experimental de sus neutrinos y el descubrimiento de que la paridad no se conservaba en los procesos en los que intervenían neutrinos. Ambos aspectos fueron ya señalados en el capítulo 4. En aquellos años tuvo lugar también el comienzo de una nueva colaboración científica con su gran amigo Werner Heisenberg. A finales de 1957 Heisenberg informó a Pauli sobre sus intentos de encontrar una ecuación general no lineal que permitiese describir todas las propiedades de las partículas fundamentales (la *world formula*). Pauli se mostró entusiasmado con el proyecto y comenzó a trabajar inmediatamente en el mismo. Heisenberg señaló que nunca había visto tan excitado a Pauli, quien estaba firmemente convencido de que este nuevo trabajo sería el punto de partida para encontrar finalmente una teoría unificada de campos de las partículas elementales.

A comienzos de 1958 Pauli se trasladó a Estados Unidos durante tres meses con la idea de dar a conocer su nuevo proyecto, convencido de que tendría un impacto enorme entre sus colegas americanos. En cambio, Heisenberg consideraba que el proyecto aún se encontraba en una fase muy inicial e intentó convencer a Pauli para que no impartiese ningún seminario sobre el mismo: «No me gustaba la idea de este encuentro entre Wolfgang, sumido en su estado de gran excitación, y los pragmáticos físicos americanos. [...] Desgraciadamente, no pude convencerle». Pauli impartió un seminario «secreto» en la Universidad de Columbia. Abraham Pais, que asistió a dicho seminario, escribió:

> No era el Pauli que yo había conocido durante tantos años. Habló siempre de modo dubitativo y sin demasiada convicción. Tras el seminario, algunos de nosotros, incluyendo a Bohr, nos acercamos a él. Pauli le dijo a Bohr: «Debe pensar que todo esto es una locura», a lo cual Bohr contestó: «Sí, pero desgraciadamente no es lo suficientemente loca».

Pauli, que siempre criticó el trabajo de sus colegas, no pudo superar este episodio. A los pocos meses comunicó a Heisenberg su decisión de abandonar el proyecto. En julio de 1958, durante una conferencia en el CERN, la Organización Europea para la Investigación Nuclear, ambos físicos se encontraron de nuevo. Heisenberg recordó: «Tenía que impartir una breve comunicación sobre las ecuaciones de campo, y la actitud de Wolfgang hacia mí fue casi hostil». Tras la conferencia Pauli le comentó a Heisenberg: «Quizá todas nuestras esperanzas se hagan realidad, y tu optimismo sea recompensado. Por mi parte, tengo que abandonar, simplemente me faltan las fuerzas para seguir».

El 5 de diciembre de 1958 Pauli abandonó abruptamente el instituto al sentirse mal. Al día siguiente fue hospitalizado y le diagnosticaron cáncer de páncreas. Le intervinieron el día 13, pero dos días después, el 15 de diciembre, falleció.

LA CONCIENCIA DE LA FÍSICA

Se ha comentado en ocasiones que la mente de Pauli, aun siendo la más brillante, no fue lo suficientemente original para poder convertirse en una de las fuerzas conductoras de la nueva teoría cuántica. Es cierto que otros físicos fueron capaces de moverse mejor en el estado de confusión e incertidumbre en el que se encontraba la física en la década de 1920. Bohr, Heisenberg o Dirac se desenvolvían en la densa niebla haciendo propuestas originales sin calibrar si las mismas harían aún más borroso el paisaje o terminarían por aclararlo totalmente. Así surgieron las grandes ideas que dieron origen a la mecánica cuántica.

Pauli fue una personalidad compleja, que siempre mantuvo una lucha entre su necesidad de claridad y certeza (su afán por racionalizar todas sus ideas) y su imperioso deseo de mostrar al mundo, y sobre todo a sí mismo, que él también era capaz de generar ideas geniales. Este fue el sino de su vida. Pensó que era un revolucionario para terminar descubriendo que solo había sido un clásico conservador. Mirando su obra en perspectiva, observamos que no es fácil desligar ambos aspectos. ¿Fue original? La respuesta brilla por sí misma. Ahí está su principio de exclusión que nos ha permitido entender la íntima estructura de la materia. Ahí están sus hipotéticos neutrinos, que finalmente se hicieron reales y terminaron convirtiéndose en uno de los temas más impactantes y fructíferos de la física actual. Ahí están también sus innumerables críticas, que ayudaron a otros físicos a proponer nuevas ideas originales.

Pauli fue el «hipercrítico» de la física. Sus comentarios, siempre mordaces e irónicos, eran temidos por sus colegas, y no todos ellos tuvieron el temple suficiente para aceptarlos de buen grado. Sin embargo, aquellos que mejor le conocieron afirmaron que discutir con Pauli siempre les obligó a profundizar en sus ideas, a plantearse cuestiones en las que hasta ese momento no habían pensado, en definitiva, a elaborar sus teorías de un modo mucho más claro, completo y consistente.

Sin Pauli, sin su obra y sus críticas, la física moderna sería probablemente muy distinta. Es posible que él no supiese caminar a través de la niebla tan bien como algunos de sus colegas, pero fue él quien dio solidez y coherencia a la nueva física que estaba emergiendo. Pauli se refería a la física clásica como «ese majestuoso edificio». Quizá era la única forma en la que él podía entender la física y la ciencia en general, como un majestuoso edificio donde todas sus partes, íntimamente relacionadas entre sí, mostraban una perfecta armonía. Pauli se erigió en la conciencia de la física, y sus críticas hicieron posible que la física moderna terminase alzándose como el majestuoso edificio que hoy día conocemos.

Lecturas recomendadas

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.
GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.
HOOFT, G., *Partículas elementales*, Barcelona, Drakontos, 2008.
KRAGH, H.S., *Generaciones cuánticas: una historia de la física en el siglo XX*, Madrid, Akal, 2007.
PENROSE, R., *El camino a la realidad*, Madrid, Debate, 2006.
SÁNCHEZ, J.L. Y CASSINELLO A., *La realidad cuántica*, Barcelona, Crítica, 2012.
SÁNCHEZ, J.M., *Historia de la física cuántica*, Barcelona, Crítica, 2001.
TERESI D. Y LEDERMAN L., *La partícula divina*, Barcelona, Drakontos, 2007.
YNDURÁIN, F.J., *Electrones, neutrinos y quarks*, Barcelona, Crítica, 2011.

Índice